

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО  
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР

КУЙБЫШЕВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ имени академика С. П. КОРОЛЕВА

К. А. ЖУКОВ, Е. А. МИЛОВ,  
Н. И. ЕПИШЕВ

# ЭКСПЛУАТАЦИОННАЯ НАДЕЖНОСТЬ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

*Утверждено редакционно-издательским  
советом института в качестве учебного пособия*

Жуков К. А., Милов Е. А., Епишев Н. И. *Эксплуатационная надежность авиационной техники*: Учебное пособие. — Куйбышев: КуАИ, 1987. — 109 с.

В пособии изложены теоретические и инженерные методы обеспечения надежности авиационной техники, основы математического аппарата теории надежности, инженерные основы обеспечения надежности на этапах создания, доводки и производства авиатехники. Рассмотрены вопросы анализа надежности по данным об отказах и неисправностях в эксплуатации. Даны рекомендации по повышению надежности на различных этапах жизненного цикла изделия.

Учебное пособие предназначено для студентов специальности «Эксплуатация летательных аппаратов и двигателей».

Рецензенты: *Заров Г. Э., Михеенков Е. П., Просвилов Ю. Е.*

## В В Е Д Е Н И Е

Резкое повышение эффективности использования техники, разработка и постановка на производство новых поколений высокоэффективных машин и оборудования рассматриваются в настоящее время как одно из генеральных направлений развития промышленности, транспорта и других отраслей народного хозяйства СССР на ближайшую пятилетку и на период до 2000 года [1]. Поставленная проблема включает в себя много взаимосвязанных аспектов, основными из которых являются повышение производительности машин, их экономичности и надежности, совершенствование системы их эксплуатации.

На воздушном транспорте планируется начать эксплуатацию новых высокоэффективных самолетов для всех сфер применения авиации — магистральных (пассажирских, грузовых), для Арктики и Антарктики, для местных воздушных линий. На базе этого намечено дальнейшее увеличение пассажирооборота, сокращение удельного расхода топлива. Очевидно, что задача высокоэффективного использования новой сложной, энергонасыщенной авиационной техники при постоянно возрастающем объеме перевозок выдвигает на одно из первых мест требование обеспечения безопасности полетов, одним из основных аспектов которого является надежность летательных аппаратов.

Проблема обеспечения надежности авиатехники является комплексной, включающей в себя организационные, информационные, технические проблемы, решаемые на всех стадиях разработки, производства и эксплуатации техники. При-

чем, вопросы обеспечения надежности, решаемые на различных стадиях жизненного цикла изделия, должны рассматриваться взаимосвязанно. Так, в процессе эксплуатации необходимо учитывать особенности техники, обусловленные ее созданием, в то же время на этапах разработки и производства необходимо полнее использовать информацию, полученную при эксплуатации техники с целью дальнейшего ее совершенствования.

В настоящем пособии рассматриваются перечисленные аспекты обеспечения надежности в том объеме, который необходимо знать инженеру-механику по эксплуатации летательных аппаратов и двигателей. Отдельные главы пособия сгруппированы в соответствии с различными аспектами надежности. В первых двух главах рассматриваются основные понятия, терминология, математический аппарат теории надежности, при этом особое внимание уделено надежности сложных систем как наиболее характерных для современных летательных аппаратов. Терминология и понятия приведены в соответствие с требованиями современной нормативной документации [2, 3].

Физическим основам надежности, инженерным методам ее обеспечения при разработке, доводке и производстве авиатехники, а также методам назначения и проведения специальных испытаний изделий на надежность посвящены главы 3, 4, 5. Рассматриваются и способы ускоренных (в 3—5 раз) испытаний, эквивалентных по исчерпанию долговечности основных деталей и узлов ресурсу, назначаемому в эксплуатации.

Глава 6 посвящена вопросам анализа надежности по данным эксплуатации ЛА. При рассмотрении вопросов широко применяется аппарат теории надежности и приведено достаточно большое число примеров решения задач оценки надежности авиационной техники (АТ) в эксплуатации.

---

# 1. ПОКАЗАТЕЛИ И ХАРАКТЕРИСТИКИ НАДЕЖНОСТИ

## 1.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ, ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

В теории надежности в целях разработки методов и средств обеспечения и анализа уровня надежности разработана терминология, согласно которой все понятия и определения разделяются на следующие основные группы: объекты (изделия), свойства, состояния, события, количественные показатели.

Все объекты (изделия), рассматриваемые в теории надежности, разделяются на ремонтируемые и неремонтируемые, восстанавливаемые и невосстанавливаемые.

*Восстанавливаемый объект* — объект, для которого в рассматриваемой ситуации восстановление работоспособного состояния предусмотрено в нормативно-технической и конструкторской документации. Когда такое восстановление не предусмотрено, объект относится к невосстанавливаемым. Под восстановлением понимают операции замены, регулирования и контроля технического состояния элементов и объекта в целом. Восстановление следует отличать от ремонта, который осуществляется в условиях ремонтного завода и при котором происходит восстановление ресурса объекта в целом.

*Ремонтируемый объект* — объект, для которого проведение ремонтов предусмотрено в нормативно-технической и конструкторской документации.

Большинство авиационных изделий: самолеты, двигатели и оборудование — относятся к восстанавливаемым и ремонтируемым.

В ГОСТ 27.002-83 дано следующее определение термина «надежность»:

*Надежность* — свойство объекта 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 транспортировки.

Надежность является сложным свойством, которое в зависи-

мости от назначения объекта и условий его применения состоит из сочетаний свойств: безотказности, долговечности, ремонтпригодности и сохраняемости. Каждое из этих свойств имеет строгое определение по ГОСТ 27.002-83 и поддается количественной оценке.

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

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

При сравнении свойств безотказности и долговечности следует иметь в виду, что для безотказности определяющим является условие непрерывного сохранения работоспособности в течение некоторого времени, а долговечность определяется при наличии технического обслуживания и ремонтов.

*Ремонтпригодность* — свойство объекта, заключающееся в приспособленности к предупреждению и обнаружению причин возникновения отказов, повреждений и поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путем проведения технического обслуживания и ремонтов. Ремонтпригодность, таким образом, представляет собой совокупность технологичности при техническом обслуживании и ремонтной технологичности.

*Сохраняемость* — свойство объекта сохранять значения показателей безотказности, долговечности и ремонтпригодности в течение и после хранения и (или) транспортирования.

Определения безотказность, долговечность, ремонтпригодность содержат термины «состояние», «отказ», «повреждение» и т. д. По ГОСТ 27.002-83 различают исправное, неисправное, работоспособное, неработоспособное и предельное состояния объекта.

*Исправное состояние* — состояние объекта, при котором он соответствует всем требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской документации. Документация устанавливает номенклатуру параметров, имеющих количественные оценки и качественные признаки, а также пределы их допустимых изменений.

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

При несоответствии хотя бы одному из требований документации объект считается неисправным, а при выходе значений хотя бы одного из параметров за установленные пределы — неработоспособным.

Как следует из определений, понятие «исправное состояние» включает в себя более широкий круг требований к объекту, чем «работоспособное». Работоспособный объект может быть неисправным (например, нарушение лакокрасочного покрытия или паралины на корпусе двигателя и т. п.), однако при этом его повреждения не влияют на функционирование. Разрешается применение краткой формы перечисленных терминов: «исправность», «неисправность», «работоспособность», «неработоспособность».

*Предельное состояние* — состояние объекта, при котором его дальнейшее применение по назначению недопустимо или нецелесообразно либо восстановление его исправного или работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно.

Переход объекта в предельное состояние влечет за собой прекращение применения неремонтируемого объекта. Ремонтируемые объекты подвергаются капитальному или среднему ремонту.

Переход объекта из одного состояния в другое происходит в результате процессов, называемых событиями.

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

Повреждения в случае их неустранения могут развиваться и приводить к отказам. Например, неустраненное своевременно нарушение лакокрасочного покрытия может привести к появлению коррозии с последующим разрушением детали.

*Дефект* (по ГОСТ 15467-79) — каждое отдельное несоответствие продукции установленным требованиям.

Следует различать понятия «дефект» и «неисправность». Термин «неисправность» является краткой формой термина «неисправное состояние» и обозначает состояние, в которое переходит объект вследствие дефектов. Термин «неисправность» применяют при использовании, хранении и транспортировании изделий, при этом предполагается, что до появления повреждения изделие было исправным. Этот термин распространяется только на готовые изделия. Термин «дефект» применяется для обозначения качества продукции на всех стадиях ее существования, начиная с изготовления. Могут быть дефекты деталей, дефекты сборки, регулировки изделия. Применяют этот термин, в отличие от термина «неисправность», также и для оценки качества материалов, химических продуктов и т. п. Таким образом, термины «дефект» и «неисправность» связаны, но не являются синонимами.

*Отказ* — событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта. Признаками возникновения отказа являются недопустимые изменения признаков работоспособно-

Интенсивность отказов — одна из важнейших и очень распространенных характеристик надежности.

Параметры  $P(t)$ ,  $f(t)$ ,  $\lambda(t)$  могут быть приближенно определены по результатам эксплуатации или испытаний достаточно большого числа однотипных устройств:

$$P(t) \approx \frac{N_n(t)}{N}; \quad (1.7)$$

$$f(t) \approx \frac{\Delta n(t, t + \Delta t)}{N \Delta t}; \quad (1.8)$$

$$\lambda(t) \approx \frac{\Delta n(t, t + \Delta t)}{N_n(t) \Delta t}, \quad (1.9)$$

где  $N, N_n(t)$  — число однотипных устройств, взятых под наблюдение и оказавшихся исправными к моменту времени  $t$ ;

$\Delta n(t, t + \Delta t)$  — число отказов в интервале времени  $\Delta t$ .

Статистические оценки функций (1.7), (1.8), (1.9) являются ступенчатыми, так как при каждом отказе  $N_n(t)$  и  $\Delta n(\Delta t)$  изменяются на единицу. Но при больших  $N$  эти функции сколь угодно близко приближаются к непрерывным (1.1), (1.3), (1.5).

Очевидно, что  $P(t)$  — убывающая функция времени, так как число  $N(t)$  с увеличением наработки уменьшается. При

$t = 0$   $P(t) = 1$ , а при  $t \rightarrow \infty$   $P(t) \rightarrow 0$ . Функция  $Q(t)$  имеет обратный вид. Примерный вид функции  $P(t)$  и  $Q(t)$  показан на рис. 1.1.

Соотношение (1.6) между величинами  $\lambda(t)$ ,  $f(t)$  и  $P(t)$  позволяет получить одну из наиболее практически важных зависимостей в теории надежности. Из уравнений (1.2) и (1.4) следует

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = - \frac{dP(t)}{dt}. \quad (1.10)$$

Подставив последнее выражение в (1.6), имеем

$$-\lambda(t) = \frac{1}{P(t)} \frac{dP(t)}{dt}. \quad (1.11)$$

Разделяя переменные в уравнении (1.11), проинтегрируем его в пределах от 0 до  $t$  и соответственно от 1 до  $P(t)$ :

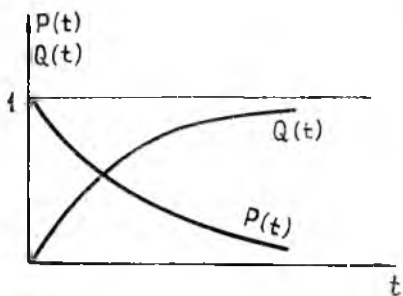


Рис. 1.1. Примерный вид функций  $P(t)$ ,  $Q(t)$



$$-\int_0^t \lambda(t) dt = \int_1^{P(t)} \frac{1}{P(t)} dP(t).$$

Получаем

$$\ln P(t) = -\int_0^t \lambda(t) dt,$$

откуда

$$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}. \quad (1.12)$$

Формула (1.12) выражает надежность через интенсивность отказов в общей форме, предполагая лишь, что  $\lambda(t)$  — интегрируемая функция времени.

*Параметр потока отказов* применяется для оценки безотказности только восстанавливаемых изделий, т. е. изделий, которые после очередного отказа восстанавливаются и вновь работают до очередного отказа. Для таких объектов моменты отказов на оси времени образуют поток отказов, который характеризуется «ведущей функцией» данного потока — математическим ожиданием числа отказов за время  $t$ .

$$\Omega(t) = M[r(t)],$$

где  $\Omega(t)$  — ведущая функция потока;

$M$  — символ математического ожидания;

$r(t)$  — число отказов за время  $(t)$ .

Параметр потока отказов характеризует среднее число отказов в малом интервале времени и равен

$$\omega(t) = \Omega'(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{M[r(t + \Delta t)] - M[r(t)]}{\Delta t}.$$

Параметр потока отказов связан с ведущей функцией соотношением  $\Omega(t) = \int_0^t \omega(x) dx$ .

*Средняя наработка до отказа*  $(t)$  — математическое ожидание наработки объекта до первого отказа. Из теории вероятности известно, что математическое ожидание для непрерывной случайной величины  $t$ , существующей в интервале  $0, \infty$  выражается интегралом:

$$\bar{t} = \int_0^{\infty} t f(t) dt.$$

Учитывая соотношение (1.10), получаем

$$\bar{t} = -\int_0^{\infty} t dP(t).$$

Интегрируя по частям, получаем

$$\bar{t} = -t P(t) \Big|_0^{\infty} + \int_0^{\infty} P(t) dt. \quad (1.13)$$

Первый член в (1.13) равен нулю, так как при  $t \rightarrow \infty$   $P(t) \rightarrow 0$ . Следовательно,

$$\bar{t} = \int_0^{\infty} P(t) dt. \quad (1.14)$$

Наиболее точный способ оценки  $\bar{t}$  опытным путем — испытание  $N$  изделий, до отказа. Тогда

$$\bar{t} \approx \frac{t_{от1} + t_{от2} + \dots + t_{отN}}{N}. \quad (1.15)$$

Чем больше  $N$ , тем точнее приближенное равенство (1.15).

*Гамма-процентная наработка до отказа* — наработка, в течение которой отказ объекта не возникнет с вероятностью  $\gamma$ , выраженной в процентах. Показатель определяют из уравнения

$$1 - F(t_{\gamma}) = 1 - \int_0^{t_{\gamma}} f(t) dt = \frac{\gamma}{100},$$

где  $t_{\gamma}$  — гамма-процентная наработка до отказа.

При  $\gamma = 100\%$  гамма-процентная наработка называется установленной безотказной наработкой, при  $\gamma = 50\%$  — медианной наработкой.

*Средняя наработка на отказ* — отношение наработки восстанавливаемого объекта к математическому ожиданию числа его отказов в течение этой наработки. Этот показатель означает наработку восстанавливаемого объекта, приходящуюся в среднем на один отказ в рассматриваемом интервале суммарной наработки. Способ оценки средней наработки на отказ вытекает из самого определения.

## 1.2.2. Показатели долговечности

В соответствии с ГОСТ 27.002-83 долговечность изделия оценивается ресурсом и сроком службы.

*Технический ресурс* — наработка объекта от начала его эксплуатации или ее возобновления после ремонта отдельного вида до перехода в предельное состояние.

Наработкой объекта называется продолжительность или объем работы объекта. Нарботка может измеряться в единицах времени или объема выполненной работы. В авиации наработку обычно измеряют в часах работы или посадках (например для шасси самолета).

Поскольку капитальный ремонт частично восстанавливает ресурс, отсчет наработки возобновляют по окончании ремонта, различая в связи с этим доремонтный, межремонтный, послеремонтный и полный (до списания) ресурсы.

Различают средний, гамма-процентный и назначенный ресурсы, которые представляют собой соответственно математическое ожидание ресурса, наработку, в течение которой объект не достигнет предельного состояния с заданной вероятностью  $\gamma$  %, и суммарную наработку, при которой применение объекта по назначению должно быть прекращено. Математическое определение показателей среднего и гамма-процентного ресурсов осуществляется аналогично показателям «средняя наработка до отказа» и «гамма-процентная наработка до отказа», т. е. по уравнениям:

$$\bar{T}_p = \int_0^{\infty} t f(t_p) dt = \int_0^{\infty} t dF(t_p); \quad (1.16)$$

$$1 - F(t_{p\gamma}) = 1 - \int_0^{t_{p\gamma}} f(t_p) dt = \frac{\gamma}{100}, \quad (1.17)$$

где  $\bar{T}_p$ ,  $t_{p\gamma}$  — средний и гамма-процентный ресурсы;

$F(t_p)$  — функция распределения ресурса;

$f(t_p)$  — плотность распределения ресурса.

При  $\gamma = 100\%$  гамма-процентный ресурс называется установленным ресурсом, при  $\gamma = 50\%$  — медианным ресурсом.

*Срок службы* — календарная продолжительность от начала эксплуатации объекта или ее возобновления после ремонта до перехода в предельное состояние.

Срок службы измеряют в единицах времени. Соотношение ресурса и срока службы зависит от интенсивности использования объекта.

Сроки службы подразделяются на средний, гамма-процентный и назначенный, которые представляют соответственно математическое ожидание срока службы, календарную продолжительность эксплуатации до достижения предельного состояния с вероятностью  $\gamma$  % и календарную продолжительность эксплуатации, при достижении которой применение объекта по назначению должно быть прекращено. Математическое определение показателей среднего и гамма-процентного сроков службы осуществляется аналогично показателям ресурсов по уравнениям (1.16) и (1.17) с соответствующей заменой аргументов.

Назначенные ресурс и срок службы устанавливаются с целью заблаговременного принудительного прекращения применения объекта по назначению исходя из требований безопасности или экономических соображений.

### 1.2.3. Показатели ремонтпригодности и сохраняемости

Ремонтпригодность изделий оценивается по ГОСТ 27.002-83 двумя показателями — вероятностью восстановления и средним временем восстановления работоспособного состояния. *Вероятностью восстановления называется* вероятность того, что время восстановления работоспособного состояния объекта не превысит заданного. *Среднее время восстановления* — математическое ожидание времени восстановления работоспособного состояния:

$$\bar{t}_в = \int_0^{\infty} t f_в(t) dt = \int_0^{\infty} t dF_в(t),$$

где  $\bar{t}_в$  — среднее время восстановления;  
 $f_в(t)$ ,  $F_в(t)$  — плотность и функция распределения времени восстановления.

Аналогично среднему времени определяется средняя трудоемкость восстановления работоспособного состояния.

Сохраняемость изделий оценивается средним и гамма-процентным сроками сохраняемости, которые представляют собой соответственно математическое ожидание срока сохраняемости и срок сохраняемости, достигаемый объектом с заданной вероятностью  $\gamma$  %. Определяются рассматриваемые показатели аналогично соответствующим показателям долговечности, т. е. по уравнениям (1.16), (1.17), в которых вместо плотности и функции распределения наработки до отказа должны рассматриваться соответствующие функции сохраняемости.

### 1.2.4. Комплексные показатели надежности

Эта группа показателей оценивает готовность изделий к применению, использование изделий и сохранение их эффективности.

*Коэффициент готовности ( $K_r$ )* — вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается. Коэффициент оценивает только готовность изделия в отношении его работоспособности. Коэффициент определяется статистически по группе из ряда объектов как

$$\hat{K}_r = \frac{\sum_{i=1}^N \xi_i}{\sum_{i=1}^N T_{\text{раб}}},$$

где  $\hat{K}_r$  — статистическая оценка коэффициента;  
 $\xi_i$  — суммарное пребывание  $i$ -го объекта в работоспособном состоянии ( $i = 1, 2, \dots, N$ );

$T_{\text{раб}}$  — продолжительность эксплуатации, за исключением простоев при проведении плановых ремонтов и технического обслуживания.

*Коэффициент оперативной готовности* ( $K_{ог}$ ) предусматривает кроме вероятности оказаться в работоспособном состоянии в произвольный момент времени также вероятность, начиная с этого момента, работать безотказно в течение заданного интервала времени:

$$K_{ог} = K_r P(t_p),$$

где  $P(t_p)$  — вероятность безотказной работы объекта в течение времени  $t_p$ .

*Коэффициент технического использования* ( $K_{ти}$ ) характеризует интенсивность использования объекта.

Коэффициент определяется статистически по уравнению

$$\widehat{K}_{ти} = \frac{\sum_{i=1}^N \xi_i}{\sum_{i=1}^N T_{\text{эксн}}},$$

где  $T_{\text{эксн}}$  — продолжительность эксплуатации, состоящей из интервалов времени работы, технического обслуживания и ремонтов.

*Коэффициент планируемого применения* — доля периода эксплуатации, в течение которой объект не должен находиться на плановом техническом обслуживании и ремонте.

Вычисляется коэффициент как отношение

$$K_{пп} = \frac{T_{\text{зал}} - T_{\text{птр}}}{T_{\text{зал}}},$$

где  $T_{\text{зал}}$  — заданная продолжительность эксплуатации;  
 $T_{\text{птр}}$  — суммарная продолжительность плановых технических обслуживаний и ремонтов за время  $T_{\text{зал}}$ .

### 1.2.5. Частные показатели надежности

Для авиационных двигателей с учетом специфики проявления неисправностей и их последствий все неисправности делят на три основные группы:

отказы, проявившиеся в полете и обнаруженные экипажем; эта группа отказов непосредственно влияет на безопасность полетов и на вероятность выполнения задания;

отказы, приведшие к досрочному, до выработки ресурса, снятию двигателей с летательного аппарата (независимо от того, где произошли или когда были выявлены эти отказы);

отказы и дефекты, устраненные в эксплуатации (без снятия двигателя с летательного аппарата).

В соответствии с разделением неисправностей определяются среднестатистические величины наработки на отказ или неисправность по совокупности двигателей данного типа в целом за определенный календарный период эксплуатации (квартал, полугодие, год, несколько лет) [4]:

$$T_{\text{п}} = \frac{t_{\Sigma}}{n_{\text{п}}}; \quad T_{\text{дсд}} = \frac{t_{\Sigma}}{n_{\text{дсд}}}; \quad T_{\text{оуэ}} = \frac{t_{\Sigma}}{n_{\text{оуэ}}},$$

где  $T_{\text{п}}$ ,  $T_{\text{дсд}}$ ,  $T_{\text{оуэ}}$  — наработка на отказ, проявившийся в полете, приведший к досрочному съему двигателя, устраненный в эксплуатации соответственно;

$$t_{\Sigma} = \sum_{i=1}^N t_i \text{ — суммарная наработка рассматриваемых двигателей;}$$

$t_i$  — наработка каждого из  $N$  рассматриваемых изделий;

$n_{\text{п}}$ ,  $n_{\text{дсд}}$ ,  $n_{\text{оуэ}}$  — общее количество отказов в полете, досрочно снятых двигателей и неисправностей, устраненных в эксплуатации соответственно.

Наработка на отказ, проявившийся в полете и приведший к выключению двигателей

$$T_{\text{п выкл}}^* = \frac{t_{\Sigma}}{n_{\text{п выкл}}},$$

где  $n_{\text{п выкл}}$  — общее количество отказов, приведших к выключению двигателя в полете.

При обработке и анализе статистических данных по неисправностям авиационных двигателей вместо показателей  $T_{\text{п}}^*$ ,  $T_{\text{дсд}}^*$ ,  $T_{\text{оуэ}}^*$ ,  $T_{\text{п выкл}}^*$  чаще используются показатели, характеризующие количество отказов, приходящихся на 1000 ч наработки двигателей. Например, показатель

$$K_{1000 \text{ п}} = \frac{1000}{T_{\text{п}}},$$

указывает количество отказов в полете, обнаруженных экипажем, на 1000 ч наработки.

Соответственно:  $K_{1000 \text{ дсд}}$  — количество досрочных съемов;  $K_{1000 \text{ оуэ}}$  — количество неисправностей, устраненных в эксплуатации без снятия двигателей;  $K_{1000 \text{ п выкл}}$  — количество отказов, приведших к выключению двигателей в полете на 1000 ч наработки.

### 1.3. ХАРАКТЕРИСТИКИ НАДЕЖНОСТИ

Изучение опыта эксплуатации показало, что большинству технических устройств свойственны три типичных периода их эксплуатации, характеризующиеся различным уровнем интен-

сивности отказов и разными закономерностями ее изменения во времени. Зависимость интенсивности отказов по наработке называется  $\lambda$ -характеристикой.

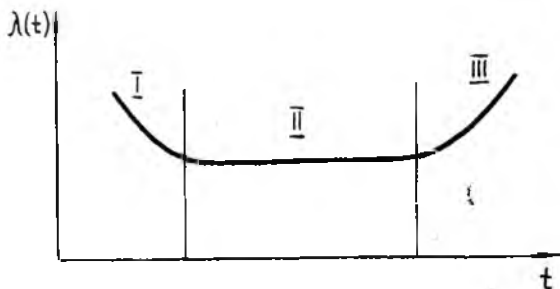


Рис. 1.2. Типичная  $\lambda$ -характеристика

Первый период эксплуатации (рис. 1.2), называемый приработкой, характеризуется повышенным уровнем интенсивности отказов из-за недостаточного качества изделий, поступающих в эксплуатацию. Изделия, имеющие скрытые дефекты, не выявленные в процессе контроля и испытания при производстве, выходят из строя вскоре после начала эксплуатации.

При нормальной эксплуатации интенсивность отказов практически не зависит от времени наработки изделий. Причины отказов в этот период связаны главным образом с внезапным воздействием неучтенных при проектировании изделия факторов, случайными причинами, учет которых невозможен.

Третий период эксплуатации характеризуется возрастанием интенсивности отказов, связанным со старением изделия и его составных частей, с накоплением необратимых повреждений. Основной путь повышения надежности изделия в этот период — профилактические мероприятия.

$\lambda$ -характеристики имеют важное значение для решения вопросов обеспечения надежности изделия, таких как назначение величины ресурса, сроков и содержания регламентных работ и т. д. На основе  $\lambda$ -характеристик строят и другие зависимости надежности —  $f(t)$ ,  $P(t)$ , связанные с  $\lambda(t)$ .

При решении вопросов обеспечения надежности с использованием характеристик надежности важно описать эти характеристики какими-то математическими моделями, т. е. аппроксимировать действительное распределение времени безотказной работы теоретическими распределениями. Наиболее часто для этих целей используются экспоненциальное, нормальное, нормально-логарифмическое распределения, распределения Вейбулла, Рэлея и т. д.

где  $m_t$  — среднее значение случайной величины  $t$ ;

$\sigma_t$  — среднее квадратическое отклонение.

Средняя наработка на отказ при нормальном распределении есть его параметр, т. е.  $m_t = \bar{t}$ .

Вероятность отказа при нормальном распределении в соответствии с (1.2), (1.22) равна

$$Q(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_t} \int_0^t e^{-\frac{(t-\bar{t})^2}{2\sigma_t^2}} dt. \quad (1.23)$$

Интеграл в уравнении (1.23) через элементарные функции не выражается и его находят по таблицам функции Лапласа [5]:

$$\Phi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t e^{-\frac{1}{2}z^2} dz,$$

где

$$z = \frac{t-\bar{t}}{\sigma_t}.$$

Нормальное распределение описывает распределение случайной величины в диапазоне значений от  $-\infty$  до  $+\infty$ . Так как время работы изделия не может принимать отрицательных значений, то для оценки распределения продолжительности срока службы нормальный закон в чистом виде неприменим. Для этих целей используют усеченное нормальное распределение.

Усеченное нормальное распределение получают из нормального путем ограничения интервала изменения этой величины. Плотность усеченного распределения

$$\bar{f}(t) = c f(t),$$

где  $c$  — нормирующий множитель, получаемый из условия

$$c \int_0^{\infty} \bar{f}(t) dt = 1. \quad (1.24)$$

Из уравнения (1.24)

$$c = \frac{1}{\int_0^{\infty} f(t) dt} = \frac{1}{1 - \int_{-\infty}^0 f(t) dt} = \frac{1}{1 - \Phi(t=0)},$$

где  $\Phi(t=0)$  доля площади под кривой Гаусса, отбрасываемая при «усечении», т. е. при ограничении интервала изменения  $t$  от 0 до  $\infty$ .

При малой доле отбрасываемой величины  $\Phi(t=0)$ , что имеет место при  $\sigma/\bar{t} \leq 0,5$ ,  $c \approx 1$  и  $\bar{f}(t) \approx f(t)$ , в расчетах можно пользоваться неусеченным нормальным распределением.



### 1.3.4. Комбинации законов распределения

Вероятность безотказной работы изделия при комбинации законов распределения, т. е. в том случае, когда имеет место сложное событие появления отказов из-за различных причин, например из-за износостойких и случайных, определяется по правилу умножения вероятностей как вероятность сложного события:

$$P(t) = P_1(t) P_2(t),$$

где  $P_1(t)$ ,  $P_2(t)$  — вероятности безотказной работы, подчиняющиеся разным законам распределения.

Например, если имеет место комбинация экспоненциального и нормального законов распределения, имеем [4]

$$P(t) = \frac{e^{-\lambda t}}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_0^{\infty} e^{-\frac{(t-T_0)^2}{2\sigma^2}} dt, \quad (1.25)$$

Интенсивность отказов в этом случае определится из уравнения

$$\lambda = \lambda_0 + \lambda_{\text{н}}, \quad (1.26)$$

где  $\lambda_0$ ,  $\lambda_{\text{н}}$  — интенсивности отказов, распределенные по экспоненциальному и нормальному законам.

Из уравнений (1.25) и (1.26) далее находятся  $Q(t)$  и  $f(t)$ . Вид графиков в этом случае зависит от того, какой закон превалирует.

Средняя наработка на отказ при нормально-экспоненциальном распределении, полученная интегрированием выражения (1.25), равна [4]

$$\bar{T} = 1/\lambda \left( 1 - e^{-\lambda T_0 + \frac{\lambda^2 \sigma^2}{2}} \right).$$

## 2. НАДЕЖНОСТЬ СИСТЕМ

### 2.1. РЕЗЕРВИРОВАНИЕ И ЕГО РАЗНОВИДНОСТИ

Надежность системы, состоящей из многих элементов, каждый из которых характеризуется, в свою очередь, определенной надежностью, зависит от числа элементов в системе, способа их соединения и надежности каждого из элементов. Известно, что удобнее и проще спроектировать надежное изделие из высоконадежных элементов. Однако создание высоконадежных элементов может быть сопряжено с такими затратами, что это будет неприемлемо по срокам и стоимости. На практике очень часто решают вопрос обеспечения заданного уровня надежности

системы применением специального приема — резервирования, позволяющего обеспечить работоспособность объекта в целом даже в случае отказа отдельных элементов.

*Резервирование* — применение дополнительных средств и (или) возможностей с целью сохранения работоспособного состояния объекта при отказе одного или нескольких его элементов [2]. К дополнительным средствам и возможностям, применяемым при резервировании, относятся элементы, вносимые в структуру объекта в качестве резервных, функциональные, алгоритмические, информационные средства и возможности, использование избытка времени, запасов нагрузочной способности и т. д.

Резервирование в виде применения резервных элементов особенно широко используется в системах летательных аппаратов — гидравлических, электрических, топливных, противопожарных, системах управления и регулирования двигателей и т. д. В качестве примера можно привести гидравлическую систему современного самолета [6], состоящую, как правило, из нескольких самостоятельных гидросистем, каждая из которых имеет дублированные источники давления, регулирующие, предохранительные и управляющие агрегаты, приборы контроля и сигнализацию исправности. Система обеспечивает питание наиболее важных потребителей (гидроприводы управления рулями самолета, шасси, закрылков и т. п.) одновременно от двух, трех гидросистем.

В общем случае совокупность дополнительных средств и возможностей, используемых для резервирования, называется резервом. Элемент структуры, необходимый для выполнения объектом требуемых функций при отсутствии отказов его элементов, называется основным элементом; элемент, предназначенный для выполнения функций основного в случае отказа последнего, называется резервным. Для одного основного элемента может быть предусмотрено несколько резервных и, наоборот, один резервный — для нескольких основных.

По характеру нагружения различают нагруженный, облегченный, ненагруженный резерв. Нагруженный резерв — резерв, содержащий один или несколько резервных элементов, находящихся в режиме основного элемента. Облегченный резерв находится в менее нагруженном режиме, чем основной элемент. Элементы нагруженного резерва имеют тот же уровень надежности, что и резервируемые ими основные элементы объекта; элементы облегченного резерва обладают более высоким уровнем надежности, а для ненагруженного резерва условно полагают, что они, находясь в этом режиме, никогда не отказывают и не достигают предельного состояния.

Резервирование с применением резервных элементов структуры объекта называется структурным. Кроме структурного применяют временное, информационное, функциональное, нагрузочное резервирования, которые представляют собой соответственно резервирование с применением резервов времени, информации, функциональных и нагрузочных резервов. Примером временного резервирования являются накопители энергии (гидроаккумуляторы, электроаккумуляторы), которые обеспечивают некоторый резерв времени работы соответствующей системы в случае отказа основных источников энергии, а также другие устройства, обеспечивающие резервирование за счет инерционности системы.

Информационное резервирование обеспечивается избытком информации, позволяющей компенсировать потерю или искажение некоторой части информации, которые возникают при отказах элементов информационных систем. Например, системы измерения и контроля параметров работы самолетных систем кроме основных приборов имеют дублирующие устройства (сигнализаторы давления и т. п.).

Функциональное резервирование обеспечивается за счет применения в объекте многофункциональных элементов, которые в случае отказа элемента позволяют использовать его в данном объекте для других целей или в случае отказа другого элемента оставшийся работоспособным элемент принимает на себя его функции в дополнение к своим.

Нагрузочное резервирование заключается в обеспечении оптимальных запасов способности элементов выдерживать действующие на них нагрузки или во введении в объект специальных защитных или разгружающих элементов, защищающих основные от действующих на них нагрузок.

По структуре системы различают общее резервирование, при котором резервируемым элементом является объект в целом, и раздельное резервирование, при котором резервируемыми являются отдельные наиболее важные элементы объекта или их группы.

По характеру включения резервного элемента различают постоянное и динамическое резервирование. В простейшем случае постоянное резервирование — параллельное соединение элементов без переключающих устройств.

При наличии переключающих устройств, реагирующих на отказы элементов, имеет место динамическое резервирование. Часто такое резервирование представляет собой замещение отказавшего элемента резервным. Но может быть и более сложное динамическое резервирование, если отказ одного элемента приводит к сложному изменению структуры объекта. Иногда для группы одинаковых элементов предусматривают один или

несколько таких же резервных элементов, замещающих основные элементы в резервируемой группе по мере возникновения их отказов. Такое резервирование называется скользящим резервированием.

Отношение числа резервных элементов объекта к числу резервируемых ими основных элементов, выраженное несокращенной дробью, называется кратностью резерва. Резервирование с кратностью один к одному называется дублированием.

Для определения надежности системы необходимо составить расчетную схему системы, установить способы соединения элементов между собой, определить вероятностные характеристики надежности составляющих элементов, разбить систему на отдельные участки, блоки, узлы и, наконец, определить характеристики надежности отдельных участков и системы в целом.

## 2.2. РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ МЕТОДОМ СТРУКТУРНЫХ СХЕМ

### 2.2.1. Последовательное соединение элементов

Тип соединения элементов в расчетной структурной схеме (последовательное или параллельное) зависит от влияния отказов отдельных элементов на работоспособность соединения в целом.

Под последовательным соединением элементов понимают такое соединение, при котором отказ любого из элементов вызывает отказ всей системы (рис. 2.1).



Рис. 2.1. Схема последовательного соединения элементов

При выборе схемы соединения элементов все элементы рассматриваются как одноотказные, т. е. каждый из них подвержен отказу одного вида. Например [7], в монтажную схему топливной системы самолета может быть включено два фильтра. Они могут быть установлены параллельно или последовательно. Но надежность фильтров оценивается по двум видам отказов: разрыву сетки или ее засорению. Вид отказа определит отнесение монтажной схемы соединения фильтров к тому или другому типу соединения: если преобладает засорение сетки, то вид монтажного соединения и структурная схема совпадают; если преобладает разрыв сетки, то параллельно установленные фильтры оказываются последовательно соединенными в структурной схеме.

Действительно, при разрыве сетки хотя бы в одном из параллельно установленных фильтров они не выполняют своей главной функции — очистки топлива от механических примесей, и весь узел фильтрации должен считаться отказавшим.

Вероятность безотказной работы системы с последовательным соединением элементов определяется через вероятности безотказной работы элементов по теореме умножения вероятностей. По определению система с последовательным соединением работоспособна при условии, что не откажут ни первый, ни второй, ..., ни  $N$ -й элементы, их образующие. Считая отказы элементов событиями случайными и независимыми, вероятность совместного наступления событий (отсутствие отказа элемента) можно определить по уравнению

$$P(t) = \prod_{i=1}^N P_i(t), \quad (2.1)$$

где  $P(t)$   $P_i(t)$  — вероятность безотказной работы системы и  $i$ -го элемента;

$N$  — число элементов в системе.

Вероятность безотказной работы системы снижается при увеличении числа последовательно соединенных элементов и надежность системы всегда ниже надежности самого ненадежного элемента. Очевидно, что для повышения надежности такой системы необходимо повышать надежность всех элементов. Однако такой метод не всегда оправдан, и часто применяют параллельное соединение.

При экспоненциальном законе надежности элементов ( $\lambda_i = \text{const}$ ) уравнение (2.1) приобретает вид

$$P(t) = e^{-t \sum_{i=1}^n \lambda_i}. \quad (2.2)$$

При небольших значениях  $t$  и высоком уровне надежности ( $\lambda_i \leq 10^{-3}$ ) выражение (2.2) приводит к следующему значению надежности цепи последовательно соединенных элементов:

$$P(t) \approx 1 - (t/l_1 + t/l_2 + \dots + t/l_n), \quad (2.3)$$

где  $l_1, l_2, \dots, l_n$  — средние наработки на отказ элементов системы.

Выражение (2.3) позволяет делать приближенные оценки при выборе потребных уровней надежности составляющих системы.

## 2.2.2. Надежность при параллельном соединении элементов в системе

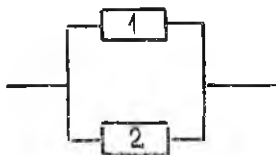


Рис. 2.2. Схема звена параллельного соединения элементов

Схема звена параллельного соединения представлена на рис. 2.2.

Отказ системы, состоящей из параллельных элементов, произойдет в случае отказа всех элементов, входящих в систему. Вероятность такого события при условии независимости и случайности отказов элементов по теореме умножения вероятностей определяется уравнением

$$Q(t) = Q_1(t) Q_2(t) \dots = \prod_{i=1}^N Q_i(t),$$

где  $Q_i(t)$  — вероятность отказа  $i$ -го элемента;  
 $N$  — число параллельно включенных элементов.

Вероятность безотказной работы в этом случае определяется по формуле

$$P(t) = 1 - Q(t) = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - P_i(t)). \quad (2.4)$$

Для случая  $\lambda_i = \text{const}$  (экспоненциальный закон надежности элементов)

$$Q(t) = \prod_{i=1}^N (1 - e^{-\lambda_i t})$$

и

$$P(t) = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - e^{-\lambda_i t}).$$

При равной надежности параллельно работающих элементов

$$Q(t) = (1 - e^{-\lambda t})^n$$

и

$$P(t) = 1 - (1 - e^{-\lambda t})^n. \quad (2.5)$$

При этом закон надежности системы уже не будет экспоненциальным. Действительно, в соответствии с соотношением (1.10) плотность вероятности отказов системы

$$f(t) = n (1 - e^{-\lambda t})^{n-1} \lambda e^{-\lambda t}.$$

Деля это выражение на (2.5) в соответствии с (1.6) имеем

$$\lambda(t) = \frac{n(1 - e^{-\lambda t})^{n-1} \lambda e^{-\lambda t}}{1 - (1 - e^{-\lambda t})^n}. \quad (2.6)$$

Из формулы (2.6) следует, что при  $\lambda_i = \text{const}$  интенсивность отказов системы с параллельным соединением элементов растет со временем. При  $t_i \rightarrow \infty \lambda(t) \rightarrow \lambda_i$ , откуда следует, что постоянное резервирование эффективно для небольших интервалов наработки. При контроле системы и восстановлении отказавших элементов интенсивность отказов системы из параллельно подключенных элементов резко уменьшается и преимущества резервирования используются наиболее полно [10].

Среднее время безотказной работы системы при отсутствии восстановления в соответствии с соотношением (1.14)

$$\bar{t} = \int_0^{\infty} [1 - (1 - e^{-\lambda_i t})^n] dt.$$

Решение последнего уравнения дает значение [11]

$$\bar{t} = \left(1 + \frac{1}{2} + \dots + \frac{1}{n}\right) \bar{t}_i,$$

где  $\bar{t}_i$  — средняя наработка до отказа элемента.

При двух параллельных элементах  $\bar{t} = \frac{3}{2} \bar{t}_i$ .

### 2.2.3. Расчет надежности сложных систем

При расчете надежности сложной системы, состоящей из параллельных и последовательных цепей, составленных, в свою очередь, из параллельно и последовательно включенных элементов, вся система представляется в виде блоков. Для каждого блока на основе уравнений (1.1) и (1.2) составляются расчетные уравнения безотказной работы, из которых образуется общее уравнение безотказной работы системы.

Например [8], в структурной схеме системы (рис. 2.3) можно выделить три блока с однотипным соединением элементов (I, II и III).

В первом блоке элементы соединены последовательно, второй составлен из параллельных цепочек, образованных последовательно включенными элементами, и третий блок — последова-

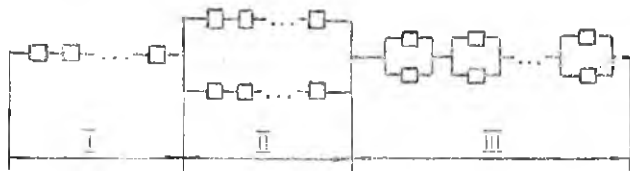


Рис. 2.3. Схема сложной системы

тельно включенные звенья, каждое из которых состоит из параллельно соединенных элементов.

Вероятность безотказной работы первого участка, состоящего из  $n$  элементов,

$$P_I = \prod_{j=1}^n P_j,$$

где  $P_j$  — вероятность безотказной работы  $j$ -го элемента участка.

Вероятность безотказной работы каждой из цепочек второго блока определяется по уравнению безотказной работы при последовательном соединении элементов, а всего участка — по уравнению (2.4), в котором вместо  $P_i(t)$  используются вероятности безотказной работы параллельных цепочек:

$$P_{II} = 1 - \prod_{l=1}^K [1 - \prod_{j=1}^N P_{j,l}],$$

где  $K$  — число параллельно включенных цепочек;

$N$  — число элементов в отдельно взятой цепочке.

Вероятность безотказной работы третьего участка, где применено поэлементное резервирование, определяется по формуле

$$P_{III} = \prod_{j=1}^m [1 - \prod_{l=1}^r (1 - P_{j,l})],$$

где  $m$  — число последовательно соединенных звеньев;

$r$  — число параллельно соединенных элементов в звене.

Вероятность безотказной работы системы в целом в рассматриваемом примере

$$P_c(t) = P_I P_{II} P_{III}.$$

В ряде случаев задача определения надежности сложной системы требует применения формулы полной вероятности. В частности, это имеет место при рассмотрении задач о системах мостовой схемы. Например [9],

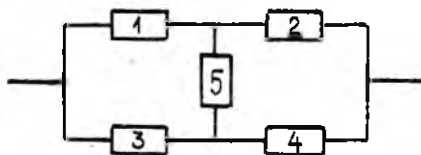


Рис. 2.4. Система мостовой схемы

система, состоящая (рис.2.4) из двух параллельных ветвей: одна с последовательными независимыми звеньями 1, 2, другая — 3 и 4 и соединяющего элемента 5, работает, если работает любая из ветвей или диагонали 1—5—4 или 3—5—2.

Безотказная работа системы (событие А) подразделяется на несовместимые события: работу системы при работоспособном



элемента  $\bar{5}$  (событие  $\bar{A}_5 A$ ) и работу системы при отказе элемента  $5$  (событие  $A_5 A$ ); иначе говоря,

$$A = A_5 A + \bar{A}_5 A,$$

где  $A_5, \bar{A}_5$  — отсутствие и наличие отказа элемента  $5$ .

Согласно теореме о вероятности суммы несовместимых событий и теореме о вероятности произведения событий [9] получим

$$P(A) = P(A_5 A) + P(\bar{A}_5 A) = P(A_5) P(A/\bar{A}_5) + P(\bar{A}_5) P(A/A_5), \quad (2.7)$$

где  $P(A/A_5)$  и  $P(A/\bar{A}_5)$  — условные вероятности безотказной работы системы при отсутствии и наличии отказа элемента  $5$ .

Событие  $A$  при условии  $A_5$  равносильно безотказности системы из двух последовательных подсистем с двумя параллельными элементами каждая, для которой имеем

$$P(A/A_5) = [1 - (1 - P_1)(1 - P_2)][1 - (1 - P_3)(1 - P_4)],$$

где  $P_1, P_2, P_3, P_4$  — вероятности безотказной работы элементов  $1, 2, 3, 4$ .

Событие  $A$  при условии  $\bar{A}_5$  равносильно безотказности системы из двух параллельных ветвей без элемента  $5$ , для которой, по правилу (2.4), имеем

$$P(A/\bar{A}_5) = 1 - [1 - P_1 P_2][1 - P_3 P_4].$$

Подстановка последних уравнений в (2.7) дает значение вероятности безотказной работы рассматриваемой системы. Решение проще производить, вычислив предварительно  $P(A/A_5)$ ,  $P(A/\bar{A}_5)$ .

### 2.3. НАДЕЖНОСТЬ СИСТЕМЫ ПРИ НЕНАГРУЖЕННОМ РЕЗЕРВЕ

На практике часто применяют метод резервирования, при котором резервные элементы или системы включаются в работу только при выходе из строя основных. Такое резервирование называется резервированием с ненагруженным резервом. Примерами такого резервирования являются аварийного выпуска шасси, системы аварийного торможения колес, имеющиеся практически на всех самолетах, аварийные источники давления в гидросистемах, включающиеся при выходе из строя основных, гидромеханические устройства системы регулирования двигателей, дублирующие электронные блоки этих систем и т. д.

Системы при ненагруженном резерве обычно имеют контрольные приборы для обнаружения отказа и переключающие устройства для включения резервных элементов и систем. Пред-

положим, что переключатели и приборы абсолютно надежны, а работающие и резервные элементы имеют одинаковую интенсивность отказов  $\lambda_i$ .

Можно рассматривать группу основных и резервных элементов как единую систему, в которой допускается несколько отказов. Если для резервирования одного элемента предусмотрены  $n$  элементов, то общее количество элементов в системе  $n + 1$  и система будет работоспособна при  $n$  отказах. Только  $n + 1$  отказов элементов вызовут отказ всей системы.

Согласно закону Пуассона вероятность появления  $n$  событий (отказов)

$$Q(n) = \frac{(\lambda t)^n}{n!} e^{-\lambda t},$$

где  $\lambda t$  — среднее число событий за время  $t$ . В этом выражении величина  $e^{-\lambda t}$  представляет собой вероятность того, что не произойдет ни одного отказа. Вероятность появления одного отказа равна  $\lambda t e^{-\lambda t}$ ; двух отказов —  $(\lambda t)^2 \times e^{-\lambda t}/2!$  и т. д. Вероятность того, что произойдет не более одного отказа, равна  $e^{-\lambda t} + \lambda t e^{-\lambda t}$ , не более двух отказов —  $e^{-\lambda t} (1 + \lambda t + (\lambda t)^2/2!)$  и т. д. Вероятность того, что в системе произойдет не более  $n$  отказов, т. е. вероятность безотказной работы системы с  $n$  резервными элементами равна [10]:

$$\begin{aligned} P(t) &= e^{-\lambda t} \left[ 1 + \frac{\lambda t}{1!} + \frac{(\lambda t)^2}{2!} + \dots + \frac{(\lambda t)^n}{n!} \right] = \\ &= \sum_{m=0}^n \frac{(\lambda t)^m}{m!} e^{-\lambda t}. \end{aligned}$$

При дублировании ( $n = 2$ ) вероятность безотказной работы

$$P(t) = (1 + \lambda t) e^{-\lambda t}.$$

Средняя наработка на отказ получается интегрированием  $P(t)$ :

$$T = \int_0^{\infty} \sum_{m=0}^n \frac{(\lambda t)^m}{m!} e^{-\lambda t} dt = \frac{n}{\lambda} n T_1, \quad (2.8)$$

где  $T_1 = \frac{1}{\lambda}$  — средняя наработка на отказ одного элемента.

Для дублированной системы

$$T = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt + \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} (\lambda t) dt = \frac{1}{\lambda} + \frac{1}{\lambda^2} = \frac{2}{\lambda}.$$

Надежность системы с ненагруженным резервом несколько выше надежности с нагруженным резервом, а средняя наработка на отказ значительно выше (уравнение 2.8).

В случае, когда переключющие устройства не абсолютно надежны, вероятность безотказной работы системы при дублировании по правилу умножения вероятностей

$$P(t) = e^{-\lambda t} + Q_{\text{пер}}(t) e^{-\lambda t} \lambda t,$$

где  $Q_{\text{пер}}(t)$  — вероятность отказа переключателя.

В случае, когда интенсивность отказов основных и резервных элементов системы неодинакова, определяется функция плотности распределения отказов данной комбинации элементов и вычисляется надежность системы интегрированием этой функции.

Известно [5], что совместная плотность распределения независимых случайных величин равна произведению их плотностей распределения. Если основной элемент отказал в момент времени  $t$ , а резервный начинает работать немедленно и может отказать, проработав время  $t_2$ , так, что  $t_2 = t - t_1$ , то

$$f(t_1, t - t_1) = f(t_1) f(t - t_1),$$

где  $f(t_1, t - t_1)$  — плотность распределения отказов рассматриваемой комбинации элементов;

$f(t_1), f(t - t_1)$  — плотности распределения отказов основного и резервного элементов.

Вероятность безотказной работы системы в данном случае

$$P(t) = 1 - Q(t) = 1 - \int_0^t \int_0^t f(t_1, t - t_1) dt_1 dt.$$

При экспоненциальном законе распределения цепей, имеющих интенсивности отказов соответственно  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ ,

$$P(t) = 1 - \lambda_1 \lambda_2 \int_0^t \int_0^t e^{-\lambda_1 t_1} e^{-\lambda_2(t-t_1)} dt_1 dt. \quad (2.9)$$

Решение последнего уравнения дает:

$$\begin{aligned} P(t) &= \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{-\lambda_1 t} - \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{-\lambda_2 t} = \\ &= e^{-\lambda_1 t} + \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}). \end{aligned} \quad (2.10)$$

Первое слагаемое в уравнении (2.10) представляет собой вероятность безотказной работы основного элемента, второе — увеличение вероятности безотказной работы системы, появляющееся в результате введения дублирующего элемента.

Средняя наработка на отказ такой системы

$$T = \int_0^{\infty} P(t) dt = \frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} = T_1 + T_2,$$

где  $T_1, T_2$  — средняя наработка на отказ элементов 1 и 2.

Для случая, когда переключающие устройства не абсолютно надежны, формула (2.10) записывается в виде

$$P(t) = e^{-\lambda_1 t} + R_{\text{пер}} \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}).$$

Формулу (2.9) для совместной плотности вероятности можно обобщить для случая произвольного числа резервных элементов, последовательно включаемых в работу:

$$P(t) = 1 - \int_0^t \dots \int_0^t f(t_1, t-t_1, \dots, t-t_{n-1}) dt_1, dt_2, \dots, dt,$$

где  $n-1$  — число резервных элементов.

Ненагруженный резерв может отказать и не будучи включенным в работу (из-за высокой температуры среды, вибрации, коррозии и т. д.). В таком случае появляется интенсивность отказов ненагруженного резерва, вызванных неисправностями, появившимися еще до его включения.

Если имеются два неодинаковых элемента, отказы которых подчиняются экспоненциальному закону, причем основной элемент отказывает с интенсивностью  $\lambda_1$ , а ненагруженный резерв отказывает с интенсивностью  $\lambda_2$  после включения его в работу и с интенсивностью  $\lambda_3$  до включения, то надежность такой системы

$$P(t) = e^{-\lambda_1 t} + \frac{\lambda_1}{(\lambda_1 + \lambda_3) - \lambda_2} [e^{-\lambda_2 t} - e^{-(\lambda_1 + \lambda_3)t}],$$

а если переключающее устройство не абсолютно надежно, то

$$P(t) = e^{-\lambda_1 t} + Q_{\text{пер}} \frac{\lambda_1}{(\lambda_1 + \lambda_3) - \lambda_2} [e^{-\lambda_2 t} - e^{-(\lambda_1 + \lambda_3)t}].$$

Несколько иначе, чем в рассмотренном случае резервирования с ненагруженным резервом, рассматривается надежность системы со скользящим резервированием. Типичным здесь является случай, когда ряд одинаковых агрегатов, блоков или цепей включены последовательно и одно или несколько таких устройств включаются, чтобы принять на себя функции любого отказавшего. Полный отказ системы происходит только тогда, когда отказывают все запасные элементы.

При  $n$  запасных элементах только  $(n+1)$ -й отказ приведет к отказу системы. Если в основной цепи последовательно включены  $N$  элементов, каждый с интенсивностью  $\lambda$ , интенсивность отказа цепи равна  $N\lambda$ , и при отсутствии резервирования средняя наработка на отказ системы равна  $1/N\lambda$ . Средняя наработка на отказ системы с  $n$  одинаковыми элементами ненагруженного резерва равна  $(n+1)/N\lambda$ , так как при очередном замещении отказавшего элемента работающая цепь будет снова

состоять из  $N$  элементов и средней наработкой на отказ системы будет среднее время появления  $n+1$  отказа.

Надежность системы выражается величиной

$$P(t) = \exp \left[ -\frac{N \lambda t}{n+1} \right].$$

Таким путем может быть достигнуто значительное увеличение надежности системы. При заданных требованиях к надежности системы можно определить число резервных элементов.

### 3. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ НАДЕЖНОСТИ ИЗДЕЛИЙ

#### 3.1. СНИЖЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ИЗДЕЛИЙ — СЛЕДСТВИЕ ИЗНАШИВАНИЯ (СТАРЕНИЯ) ИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Физика отказов — раздел науки о надежности машин, в котором изучаются закономерности изменения свойств и состояния материалов деталей в условиях их эксплуатации [12].

Изменение начальных свойств и состояния материалов, из которых выполнено изделие, является причиной снижения его надежности. Изучение закономерностей, описывающих процессы изменения свойств и состояния материалов, необходимо для прогнозирования поведения изделия в конкретных условиях работы и обеспечения показателей надежности в заданных пределах.

Устанавливается функциональная зависимость между скоростью изнашивания материала  $\gamma$  и рядом входных параметров  $z_i$ , характеризующих условия эксплуатации (нагрузки, скорости, температуры, воздействие рабочего тела и внешней среды, длительность работы) и состояние материала (твердость, прочность, качество поверхности и т. п.):

$$\gamma = \frac{dU}{d\tau} = \varphi(z_1; z_2; \dots; z_n, \tau),$$

где  $U$  — величина износа материала.

Знание физико-химических законов изнашивания позволяет оценить поведение изделия в различных эксплуатационных ситуациях. Существует три уровня изучения поведения материалов.

*Субмикроскопический уровень* — исследование строения атомов, молекул, кристаллических решеток — позволяет получить представление о несовершенствах в кристаллах, движении дислокаций, молекулярных силах упругости, диффузии атомов в твердых телах. Все это используется при решении основных задач прочности и долговечности материалов.

*Микроскопический уровень* — исследование зерен материала, участка с типичной структурой — используется для установления связи между составом, строением (структурой) и свойствами металлов и сплавов. На этом уровне изучается также взаимодействие двух трущихся поверхностей.

*Макроскопический уровень* — рассматривает изменение начальных свойств или состояния материала всего тела (детали).

На основе физической картины процесса на микроучастке объема рассматриваются процессы с учетом размеров, конфигурации и условий работы всей детали и разрабатываются инженерные методы расчета деталей на надежность, в которые включаются зависимости параметров прочности, деформации, износа, ползучести от времени эксплуатации.

С изнашиванием материалов связаны постепенные отказы изделий, т. е. предсказуемые отказы. Зависимости постепенных отказов от внешних нагрузок и свойств применяемых материалов выражаются более отчетливо, чем при внезапных отказах, которые возникают либо при недопустимых повреждениях материала, либо при превышении допустимой внешней нагрузки.

Предупреждение (или локализация) внезапных отказов, как правило, базируется на мероприятиях, полученных в результате опыта длительной эксплуатации изделия — прототипа.

## 3.2. ПОВЕРХНОСТНЫЙ СЛОЙ И ЕГО ПАРАМЕТРЫ

Многие виды разрушения всего тела детали начинаются с поверхности и зависят от ее состояния. Это объясняется следующим.

1. Поверхностный слой детали обладает избытком энергии, так как молекулы и атомы на поверхности имеют свободные связи, что способствует таким явлениям, как поглощение (адсорбция), сцепление (когезия), прилипание (адгезия), смачивание при взаимодействии с веществами внешней среды.

2. В результате воздействия различных технологических процессов физико-химические параметры поверхностного слоя, его структура и напряженное состояние, как правило, сильно отличаются от свойств всего объема материала детали.

3. В процессе эксплуатации идет непрерывное изменение (трансформация) параметров поверхностного слоя в значительно большей степени, чем изменения, происходящие по всему объему детали.

### Параметры поверхностного слоя

Состояние поверхностного слоя детали определяется параметрами, характеризующими:

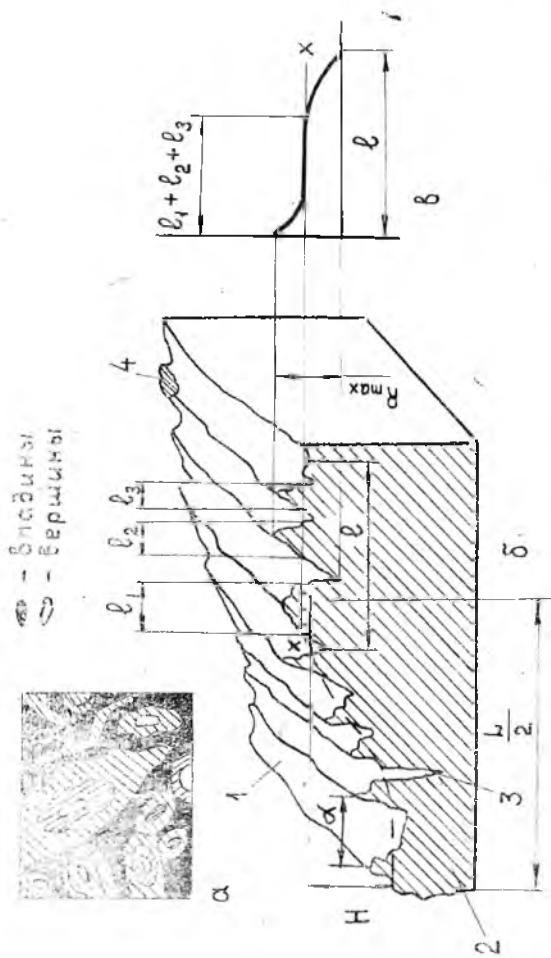


Рис. 3.1. Микрорельеф поверхности [12]: 1, 2 — продольная и поперечная шероховатости; 3 — растрескивание; 4 — скол;  $\alpha$  — топография поверхности;  $\beta$  — параметры поверхностного слоя ( $H$  — высота волны;  $\alpha$  — ее шаг;  $R_{\max}$  — максимальная шероховатость;  $l$  — базовая длина,  $x$  —  $x$  — произвольное сечение);  $\beta$  — кривая опорной поверхности

геометрию поверхности, включая микрогеометрию и отдельные дефекты поверхности (рис. 3.1, 3.2);  
 напряжения в поверхностных слоях;  
 структуру слоя как следствие пластической деформации, температурных явлений, химических процессов;  
 структуру прилегающих к поверхности адсорбированных тонких слоев смазки.

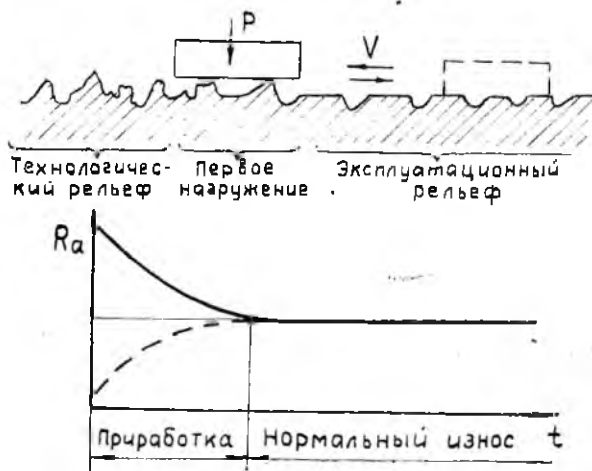


Рис. 3.2. Схема перехода технологического рельефа поверхности в эксплуатационный [12]

Остаточные напряжения в поверхностном слое оказывают существенное влияние на работоспособность деталей [11].

Примером появления остаточных напряжений может служить кольцо, из которого удален сегмент, с напряженным сомкнутое и сваренное. При разрезке это кольцо, в отличие от такого же по размерам, но ненапряженного, разойдется по месту разрезки на определенную величину  $\delta$ . На этом основано большинство методов оценки остаточных напряжений в деталях.

Остаточные напряжения возникают после неоднородной пластической деформации (когда действующие напряжения больше предела текучести  $\sigma_T$ ). Знак остаточных напряжений всегда обратный деформации, их вызвавшей: деформация растяжения вызывает остаточные напряжения сжатия, деформация сжатия — остаточные напряжения растяжения.

Механизм образования остаточных напряжений хорошо виден на примере нагружения статически неопределимой системы из трех стержней (рис. 3.3). Можно принять, что каждый из стержней имитирует отдельные зерна микрообъема детали.



При приложении нагрузки  $P$  наиболее нагруженное зерно  $a$  пластически деформируется (в отличие от зерен  $b$  и  $c$ , где пластическая деформация отсутствует или она значительно меньше).

После снятия нагрузки  $P$  в зерне  $a$  возникнут напряжения сжатия, а в зернах  $b$  и  $c$  — остаточные напряжения растяжения.

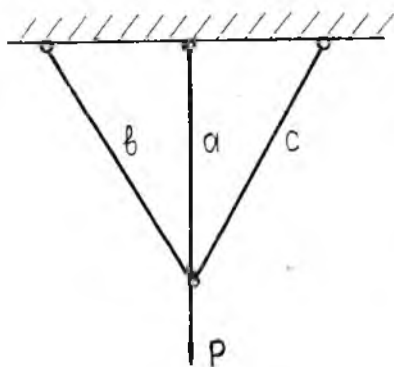


Рис. 3.3. Остаточные напряжения в системе из трех стержней [11]

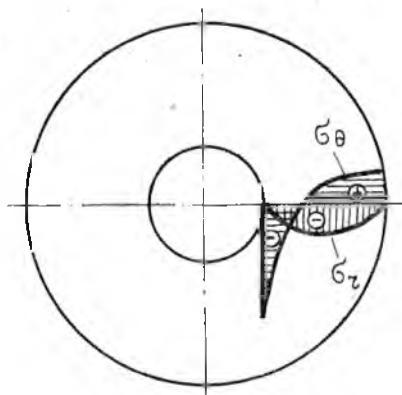


Рис. 3.4. Остаточные напряжения в диске с центральным отверстием [12]

На рис. 3.4 показаны остаточные напряжения в диске с центральным отверстием:  $\sigma_\theta$  — окружные и  $\sigma_r$  — радиальные. Остаточные напряжения представляют собой разность напряжений в упруго-пластической и упругой зонах. Так, при вращении диска с большой угловой скоростью расчетные напряжения (предполагается абсолютно упругое тело) превышают в ряде зон диска предел текучести (например, возле отверстия расчетное окружное напряжение  $\sigma_\theta > \sigma_r$ , при этом возникает остаточная деформация растяжения, а после остановки диска в области отверстия возникают сжимающие остаточные напряжения).

Пластическая деформация возникает также при значительных температурных напряжениях. При нагреве заземленного с двух сторон стержня до температуры  $t$  в нем возникают температурные напряжения сжатия  $\epsilon = -E \epsilon_t = -E \alpha t$ . Если эти напряжения будут выше предела текучести, в стержне появится остаточная деформация сжатия, после охлаждения в стержне останутся остаточные напряжения растяжения.

Остаточные напряжения сохраняются в детали длительное время, они алгебраически складываются с рабочими напряжениями, усиливая или ослабляя их. Особенно опасны растягиваю-

щие напряжения, которые приводят к понижению усталостной прочности и износостойкости.

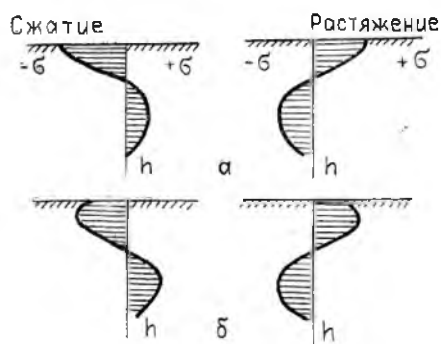


Рис. 3.5. Типичные эпюры остаточных напряжений в поверхностном слое детали

формация растяжения и после снятия нагрузки в поверхностном слое обычно образуются остаточные напряжения сжатия.

Нагрев при резании может приводить к локальным напряжениям выше предела текучести, деформациям сжатия и, как следствие, к остаточным напряжениям растяжения.

От соотношения этих двух факторов и от вида технологического процесса зависит знак остаточных напряжений на поверхности детали. При затуплении резца увеличивается склонность к появлению остаточных растягивающих напряжений.

При шлифовании решающим фактором в формировании остаточных напряжений являются температурные условия. Силовым фактором оказывает второстепенное влияние. После шлифования на поверхности образуются, как правило, остаточные напряжения растяжения.

Регулирование остаточных напряжений путем правильного выбора методов и режимов резания является одной из основных задач при построении технологического процесса.

Методы поверхностного упрочнения играют важную роль в этом регулировании (их используют для создания благоприятных остаточных поверхностных напряжений сжатия). К этим методам относятся: обдувка дробью, виброгалтовка, обкатка роликами, термопластическое упрочнение, алмазное выглаживание и др.

Конечным критерием правильности выбранных режимов механической обработки и метода поверхностно-пластического де-

Характер эпюры остаточных напряжений может быть таким, что наибольшие напряжения возникают непосредственно у поверхностного слоя (рис. 3.5, а) или на некоторой глубине (рис. 3.5, б).

При механической обработке остаточные напряжения возникают в результате деформации при силовом воздействии и от местного нагрева поверхностного слоя.

У вершины резца при силовом воздействии возникает пластическая де-

формирования (ППД) являются механические свойства детали, проверенные в эксплуатационных условиях.

Строение поверхностного слоя показано на рис. 3.6.

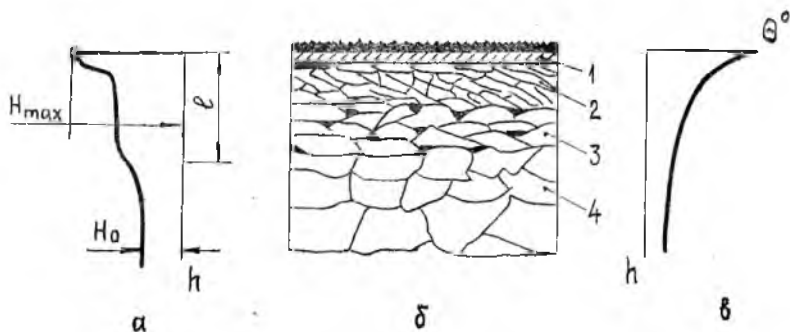


Рис. 3.6. Строение поверхностного слоя [12]: а—изменение твердости  $H$  по глубине слоя; б—структура поверхностного слоя; в—изменение температуры по глубине при резании и трении

1 — слой повышенной твердости, содержащий окисные пленки, к которым примыкает сверху аморфный адсорбированный слой из пленок, влаги, газовых загрязнений;

2 — наклепанный слой с сильно деформированной кристаллической решеткой, характеризуется определенной ориентацией (текстурой) зерен, возникшей под влиянием тангенциальных сил резания или трения;

3 — наклепанный слой с искаженной кристаллической решеткой, имеет увеличенное число дислокаций и вакансий, окислов, нитридов;

4 — металл с исходной структурой.

Глубину наклепанного слоя  $l$  можно определить по изменению микротвердости, которая на поверхности всегда выше. Степень наклепа определяется отношением  $H_{max} / H_0$ .

Поверхностные явления при наличии смазок заключаются в том, что благодаря свободным связям атомов и молекул на поверхности детали происходит их активное взаимодействие с молекулами смазки, газов и пара. Вследствие адсорбции на поверхности детали образуются тончайшие пленки масел, паров и газов с ориентированными слоями молекул поверхностно-активных веществ (ПАВ). С увеличением расстояния от твердой поверхности ориентация молекул ПАВ нарушается, а затем пропадает.

Поверхностно-активная среда влияет на процессы разрушения и деформации твердых тел. Адсорбционные пленки приво-

дят к процессу пластификации, т. е. облегчают пластическое течение в зернах, расположенных в поверхностном слое детали, так как адсорбированный слой понижает поверхностное натяжение металла.

### **3.3. СВЕДЕНИЯ О ЗАКОНОМЕРНОСТЯХ ИЗНАШИВАНИЯ. МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ПОСТЕПЕННОГО ОТКАЗА**

Численное определение величины повреждения детали в зависимости от наработки изделия в настоящее время производится экспериментальным путем в процессе создания, производства, эксплуатации и ремонта изделий. Эти исследования являются основой для оценки надежности изделий, разработки и реализации мероприятий по ее повышению.

Существуют два метода оценки степени повреждения.

Первый метод — выбираются численные критерии для непосредственного измерения величины повреждения, например, величина деформации детали, ее линейный или весовой износ, глубина и размер каверы при локальном разрушении поверхности.

Однако в ряде случаев, особенно при локальных видах повреждения, бывает трудно непосредственно оценить степень повреждения.

Второй метод — о повреждении судят по изменению выходного параметра. Например, при местных повреждениях тела детали или при возникновении пластических зон о степени повреждения судят по потере несущей способности — параметров прочности. О локальных повреждениях золотников гидросистем судят по падению или колебанию давления жидкости, о степени повреждения многих узлов трения можно судить по возрастанию температуры рабочего тела и коэффициента трения. Так устанавливают предельное состояние при испытании на долговечность подшипников качения.

Для резервуаров, трубопроводов и другой гидро- и пневмоаппаратуры о процессе изнашивания можно судить по основному выходному параметру — герметичности.

При оценке потерь работоспособности насосов как результата износа ряда элементов (плунжеров, клапанов и др.) определяют их характеристики — производительность, давление на выходе.

Оценка степени повреждения изделия по выходным параметрам позволяет установить уровень надежности, а не пути повышения его работоспособности, она в ряде случаев является вынужденной из-за трудностей непосредственной численной оценки повреждения элементов изделия.

Изменение выходных параметров при эксплуатации машины должно быть связано со степенью повреждения отдельных элементов и объяснено теми физико-химическими процессами изна-

шивания, которые в них протекают. Это основная задача повышения надежности изделий. Важным при этом является численное определение величины повреждения и затем установление связи этого повреждения с выходными параметрами. Для определения степени повреждения как функции времени необходимо, как указывалось, знать скорость протекания процесса повреждения по времени:

$$\gamma(\tau) = \frac{dU}{d\tau};$$

$$U(\tau) = \int_0^{\tau} \gamma(\tau) d\tau,$$

где  $U(\tau)$  — степень повреждения элемента изделия по времени, которая будет определять изменение во времени выходного параметра изделия.

Приведем примеры временных зависимостей, описывающих процесс повреждения.

1. Кривая ползучести сталей (сплавов)  $\epsilon_c = U = \varphi(\tau)$ . Дается зависимость остаточных (или полных) деформаций образцов при постоянных напряжениях и температуре.

Для оценки запаса по надежности обычно используется только прямолинейный участок кривой, где скорость ползучести постоянна:

$$\xi = \gamma = \frac{d\epsilon_c}{dt}.$$

Эти кривые определяют ресурс лопаток и дисков турбин при длительном статическом нагружении (рис. 3.7).

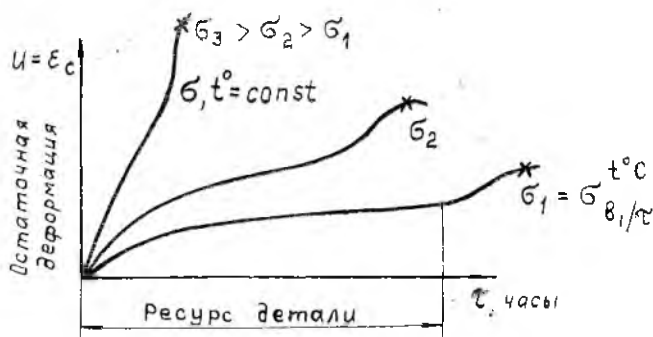


Рис. 3.7. Ползучесть материала при повышенной температуре ( $>600^\circ\text{C}$ ). разрушение образцов

$U = U, \text{ мкм}$

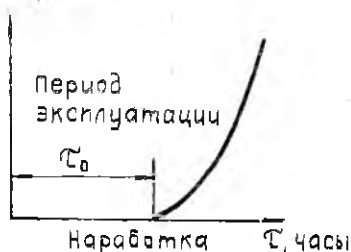


Рис. 3.8. Развитие усталостной трещины (изгибная и контактная усталость):

$$l(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < t_0; \\ \alpha_e^{\beta t} & \text{при } t > t_0 \end{cases}$$

появляется и далее развивается по экспоненциальному закону с параметрами закона  $\alpha$  и  $\beta$ .

Аналогичные зависимости могут быть получены также экспериментальным путем для изнашивания материалов, например, при химической коррозии, процессах структурного старения сплавов и т. п.

Такие исследования выполняются чаще всего для наиболее ответственных деталей конкретных изделий в процессе их создания, производства и эксплуатации (при ремонте и регламентных работах).

Следует отметить сложность и трудоемкость этих исследований, так как в большинстве случаев повреждение является комплексным. Так, усталость материала возникает одновременно с износом посадочных поверхностей детали, изменение формы конструкции и ее химическая коррозия происходят также одновременно. В этом случае зависимости  $U(t)$  и  $\gamma(t)$  значительно усложняются.

При экспериментальных исследованиях процесса изнашивания учитывается влияние следующих факторов:

- силовые и кинематические параметры (давление на поверхности трения  $P$  и скорости относительного скольжения  $V$ );
- параметры, характеризующие состав, структуру и механические свойства материалов пары ( $H_B, \sigma_s, E$  и т. п.);
- шероховатость, напряженность поверхностного слоя;
- вид трения и смазки (жидкостное, граничное, сухое);
- внешние условия (температура, наложение вибраций, наличие вакуума, метеоусловия).

2. Возникновение и развитие усталостных трещин (элементов компрессоров и турбин ГТД, беговые дорожки подшипников, кронштейны подвески СУ, рис. 3.8).

В начальный период работы конструкции усталостные трещины не обнаруживаются, хотя процесс накопления повреждений в материале идет под действием переменных напряжений (расшатывание и разрыв связей по границам зерен или внутри их — образование субмикроскопических трещин). В момент  $t_0$  — порога чувствительности — трещина

Связь между степенью повреждения и выходным параметром изделия —  $X = f(U)$  может быть в общем случае нелинейной.

Это происходит потому, что повреждение определяется физикой явлений, происходящих в материале изделия, в то время как изменение выходного параметра отражает микропроцессы, происходящие в самом изделии.

В общем случае временная зависимость для выходного параметра будет (рис. 3.9)

$$X = f(U) = f[U(\tau)].$$

Здесь функция  $U(\tau)$  является случайной, а функция  $f(U)$  описывает детерминированную зависимость.

Отказ наступает тогда, когда выходной параметр достигает предельного состояния  $X_{\max}$ . Так как  $X(\tau)$  — случайная функция, оценивается степень приближения (удаленности) параметра по отношению к предельному значению параметра, т. е. вероятность отказа (рис. 3.9,а) для фиксированного времени работы  $\tau = T$ .

Для высоконадежных систем значение параметра  $X$  значительно ниже допустимых значений (рис. 3.9,б). В этом случае изделие имеет запас надежности  $\delta_n$  и отказ практически невозможен.

Как промежуточный возможен случай, показанный на рис. 3.9,в. Здесь процесс изменения параметров стационарен, но его отдельные реализации близки к предельному значению выходного параметра  $x_{\max}$ . Здесь возможны отказы при сбоях, когда в процессе последующей работы изделия параметр опять принимает допустимое значение. В этом случае отказ называется внезапным.

*Построение моделей отказов на стадии проектирования*

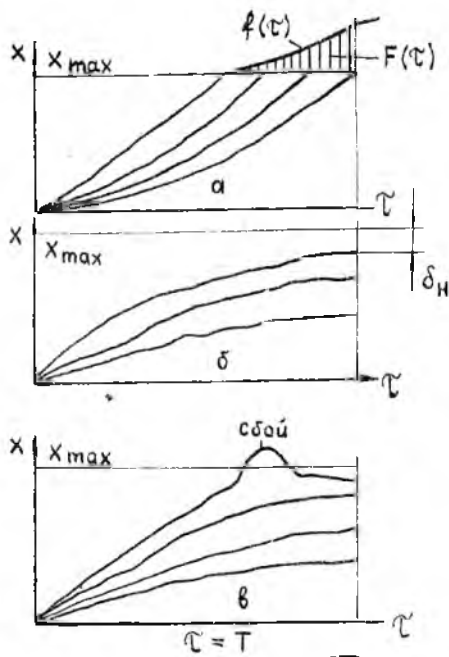


Рис. 3.9. Степень удаленности выходного параметра  $X(\tau)$  от предельного состояния [12]





Срок службы изделия

$$T = \frac{X_{\max} - a}{\gamma}$$

Для определения вероятности безотказной работы необходимо найти плотность распределения параметра  $X$  по известным распределениям независимых  $СВ$   $a$  и  $\gamma$ . Если последние имеют нормальное распределение, то величина  $X$  для каждого значения  $\tau = T$  будет распределена по тому же закону с параметрами:

математическое ожидание

$$X_{\text{ар}} = a_0 + \gamma_{\text{ср}} T;$$

среднее квадратичное отклонение

$$\sigma_x = \sqrt{\sigma_a^2 + T^2 \sigma_\gamma^2};$$

вероятность безотказной работы изделия в течение срока службы  $\tau \leq T$

$$P(T) = 0,5 + \Phi \left[ \frac{X_{\max} - a - \gamma_{\text{ср}} T}{\sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_\gamma^2 T^2}} \right].$$

Данный методический подход можно использовать и при других исходных законах распределения параметров  $a$  и  $\gamma$ .

#### 3.4. ИЗНАШИВАНИЕ ДЕТАЛЕЙ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

Изнашивания подразделяются на три основные группы (табл. 3.1): механическое, молекулярно-механическое, коррозионно-механическое изнашивание.

Механическое изнашивание происходит в результате механического взаимодействия материалов деталей или воздействия на их поверхность твердых частиц жидкостных и газоздушных потоков. Молекулярно-механическое изнашивание сопровождается воздействием молекулярных или атомных сил; коррозионно-механическое изнашивание происходит при трении материалов, вступивших в химическое взаимодействие со средой, разновидностью этого вида изнашивания является чисто коррозионное и эрозивное изнашивание (коррозия в рабочей или внешней среде, кавитация, вымывание).

По скорости процессов разрушения все виды изнашивания разделяются на быстро протекающие процессы, процессы средней скорости, медленные процессы разрушения.

К первым относятся адгезивное схватывание, сильный абразивный износ, интенсивная кавитация и коррозия, усиленная фреттинг-коррозия. Эти виды износа в изделиях недопустимы.

Классификация видов изнашивания деталей авиатехники

Таблица 3.1

Группы изнашивания	Вид изнашивания	Характерные явления при изнашивании; причины повреждения	Примеры повреждения деталей	Мероприятия по повышению работоспособности деталей
1. Механическое изнашивание	Аbrasивное изнашивание сопряженных деталей и деталей, омываемых потоками газа или жидкости	<p>Резание с отделением стружки, пластическое деформирование, наклеп с введением твердых частиц, хрупкое разрушение.</p> <p><b>Причины:</b> Попадание твердых частиц на поверхность контакта, в поток газа или жидкости, образование этих частиц в поверхностных слоях сопряженных деталей при циклических нагрузках</p>	<p>1. Задиры золотников, дросселей, клапанов</p> <p>2. Абрязивный (ослобительный) износ лопаток ГТД, лопаток винтов, кромок воздушозаборников, крыльев</p>	<p>1. Повышение степени чистоты рабочей среды (расположение силовых узлов возможно выше над землей; введение зашитаемых устройств на входе и посадке; установка фильтров тонкой очистки, специальная промывка гидросистем).</p> <p>2. Недопустимость сухого трения в сопряженных соединениях</p>
2. Молекулярно-механическое изнашивание	Контактное поверхностное изнашивание (по поверхностям сопряжения)	<p>Повторно-циклическое нагружение одних и тех же микрообъемов, накопление повреждений, разрушение микрообъемов с отделением материала с поверхности детали; усталостное разрушение детали.</p> <p><b>Причины:</b> Воздействие переменных нагрузок (неравномерных сил роторов, динамических сил на лопатках, воздушных винтах, элементах планера, в гидронасосах) в сочетании со статическими нагрузками</p>	<p>1. Контактная усталость (питтинг) зубьев, шестерек</p> <p>2. Контактная усталость (питтинг) подшипников роторов, редукторов и приводов ГТД, трансмиссий вертолетов, насосов</p>	<p>1. Снижение уровня контактных напряжений</p> <p>2. Повышение контактной прочности материала (применение более прочных материалов, цементирование, азотирование поверхностей, перепалл материала в вакуумных печах)</p> <p>3. Улучшение смазки контактирующих поверхностей</p> <p>4. Введение финишных операций поверхностного пластического деформирования</p>

Продолжение табл. 3.1

Группы изнашивания	Вид изнашивания	Характерные явления при изнашивании; причины повреждения	Примеры повреждения деталей	Мероприятия по повышению работоспособности деталей
3. Коррозивно-механическое изнашивание	Адгезионное изнашивание	Молекулярное притяжение и схватывание точечных участков поверхностей деталей, отрыв по менее прочному материалу; изгибная усталость материала от поврежденных точек (концентраторов напряжений) Причины: повышенные контактные напряжения, скорости скольжения, температуры в зоне сопряжения	1. Адгезионное разрушение поверхности замков лопаток ГТД (пазов дисков) с последующим усталостным разрушением деталей 2. Схватывание и задиры на деталях шарнирных соединений	1. Повышение твердости, чистоты и точности сопрягаемых поверхностей 2. Покрытие поверхности контакта относительно мягкими неокисляющимися материалами (например, серебром) 3. Введение финишного ППД
	Коррозионное изнашивание	Химическое взаимодействие металла с агрессивными агентами среды; изнашивание металла продуктами взаимодействия. Причины: наличие в воздухе влаги, кислорода, сернистых, азотистых соединений; в продуктах сгорания ГТД молибдена, ванадия, их агрессивных соединений; эксплуатация в условиях морского климата	Коррозия и разрушения лопаток ГТД при эксплуатации в морских условиях	1. Использование для деталей химически стойких материалов, лакокрасочных покрытий, герметиков, хлорвиниловой пленки 2. Алюминирование лопаток, эмалирование термостойкой эмалью камер сгорания и сопел ГТД
	Изнашивание из-за эрозии и кавитации	Выветривание и вымывание материала при кавитации и трении потока о поверхности детали.	1. Эрозионный износ элементов топливно-регулирующей аппаратуры	1. Устранение в гидросистемах и их агрегатах кавитационных явлений 2. Повышение чистоты жидкостей

Группы изнашивания	Вид изнашивания	Характерные явления при изнашивании; причины повреждения	Примеры повреждения деталей	Мероприятия по повышению работоспособности деталей
	Фреттинг-коррозия (коррозия трения)	<p>Причина: Динамическое воздействие на детали потока жидкости или газа</p> <p>Окисление металла и его абразивное изнашивание окислами при микроперемещениях по поверхности сопряжения (окислы не удаляются за пределы зоны трения)</p> <p>Причины: воздействие на сопряженные детали переменных нагрузок.</p>	<p>2. Кавитация золотников, крыльчаток ЦЕН</p> <p>Фреттинг - коррозия посадочных диаметров шестерен и подшипников</p>	<p>3. Повышение поверхностной твердости деталей</p> <p>См. мероприятия, направленные на устранение адгезионного изнашивания</p>

Процессы средней скорости — например, усталостные контактные или изгибные разрушения — в зависимости от интенсивности могут быть как допустимыми, так и недопустимыми.

Медленные процессы разрушения микрообъемов происходят, когда для отделения частиц износа требуется достаточно большое число циклов или при стабилизации процессов, когда вообще не будет последующего отделения частичек износа.

С целью обеспечения и расчета надежности машины необходимо знать закономерности процессов изнашивания для допустимых видов, а также мероприятия, предупреждающие возникновение недопустимых видов изнашивания.

В табл. 3.1 описаны характерные явления при изнашивании деталей авиатехники, причины их повреждения и перечисляются основные мероприятия, снижающие интенсивность наиболее опасных видов изнашивания [13, 15].

#### **4. ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ИЗДЕЛИЙ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ В ПРОЦЕССЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И КОНСТРУКТОРСКОЙ ОБРАБОТКИ (ДОВОДКИ)**

При проектировании изделия закладываются его основные свойства, которые позволяют получить при его эксплуатации заданный уровень надежности и ресурса. Эти свойства зависят и от совершенства конструкции основных узлов и элементов, и от выбранного уровня прочности нагруженных элементов, от характеристик использованных материалов и от значений параметров рабочего процесса.

Проектирование — наиболее важный процесс создания изделия. Ошибки, сделанные на этом этапе, стоят очень дорого. Считается, что если в процессе проектирования стоимость устранения обнаруженной ошибки принять за 1, то на ее устранение на этапах опытной доводки, серийного производства и эксплуатации будет затрачиваться соответственно 10, 100 и 1000 единиц. Отсюда следует исключительная ответственность проектировщиков за качество своей работы.

##### **4.1. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ НАДЕЖНЫХ ИЗДЕЛИЙ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ [4, 13, 14]**

1. Анализ условий применения. Учет этих условий в техническом задании на проектирование.

Назовем в качестве примеров некоторые условия применения, прямо влияющие на надежность самолета и двигателя: а) тип аэродромов — с грунтовыми или бетонированными взлетно-посадочными полосами (ВПП); б) климатические условия — в морских условиях или в условиях сухого воздуха, при пониженных или повышенных температурах окружающего воздуха, особые условия влажного тропического климата; в) особенности полетных трасс — короткие, средние, продолжительные; режимы работы двигателей на этих трассах; г) объект применения (для двигателя) — вертолет, самолет, транспортное наземное средство, стационарная наземная энергетическая установка.

2. Применение материалов с улучшенными свойствами (рис. 4.1). Для изделий авиационной техники характерным является постоянное стремление ввести в конструкцию высокопрочные, пластичные, легкие и коррозионно-стойкие материалы, свойства которых сохраняются длительное время. В настоящее время это высокопрочные алюминиевые, титановые сплавы и композиционные материалы в конструкциях ЛА, титановые сплавы, высоколегированные стали и жаропрочные сплавы монокри-

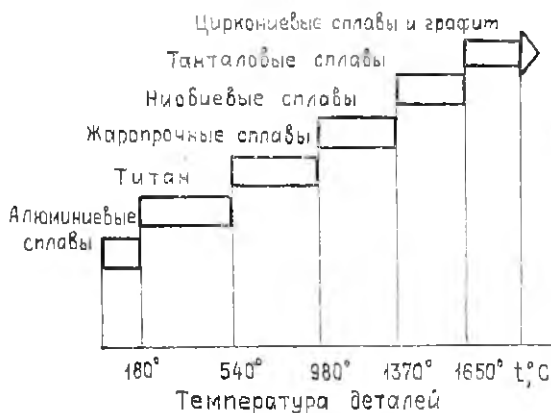


Рис. 4.1. Сплавы для авиационных и космических аппаратов

сталлической структуры в двигателестроении. В перспективе в ГТД и других двигателях возможно применение ниобиевых и танталовых сплавов. В будущем для наиболее теплонапряженных элементов двигателей и самолетов возможно применение покрытий из циркониевых сплавов и графитовых материалов, которые сейчас используются на космических кораблях.

3. Обеспечение 100% надежности основных элементов конструкции.

Это диктуется, прежде всего, стремлением обеспечить безопасность полетов. 100% надежность должны иметь такие элементы, как крылья и стабилизатор самолета, его фюзеляж, лопасти воздушных винтов, лопатки вентиляторов ГТД, их диски и валы.

4. Создание конструкций безопасного разрушения. Исключение последствий разрушения.

Примерами конструкций безопасного разрушения являются многолонжеронные крылья, сотовые конструкции оболочек и корпусов двигателей. В этих конструкциях повреждение отдельной зоны (элемента) не распространяется на всю конструкцию, а локализуется, в отличие от монолитной конструкции.

Исключение последствий разрушения достигается в двигателях, например, выполнением требования непробиваемости корпусов при обрыве лопаток, создании звена с минимальным запасом прочности в диске непосредственно под его ободом (рис. 4.2, сечение указано стрелками), автоматическим выключением двигателя при разрушении вала ротора (рис. 4.3), постановкой предельных рессор между приводом и агрегатами (на ТВД Ан-20 — стартера — генератора, на ТРДД НК-144

— гидронасоса). Надежным защитно - ограничительным средством является система автоматического флюгирования воздушных винтов ТВД Аи-20, НК-12МВ, которая срабатывает по падению крутящего момента на вале двигателя при разрушениях элементов ротора, помпажах, нарушении топливopитания двигателей.

5. Введение сигнализации разрушения.

Примерами выполнения этого принципа являются: сигнализация о появлении трещин в лопастях винтов

вертолета падением давления воздуха внутри лопасти; контроль работоспособности роторных подшипников ТРДД НК-8 по температуре их наружных колец; постановка сигнализаторов стружки на линии откачки маслосистемы двигателей.

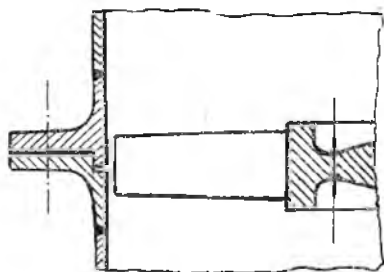


Рис. 4.2. Обеспечение непробиваемости статора ГТД при разрушении лопаток и дисков. Расположение фланцев статора над лопаточным венцом, преднамеренное создание слабого звена, разрушающегося при недопустимой раскрутке ротора

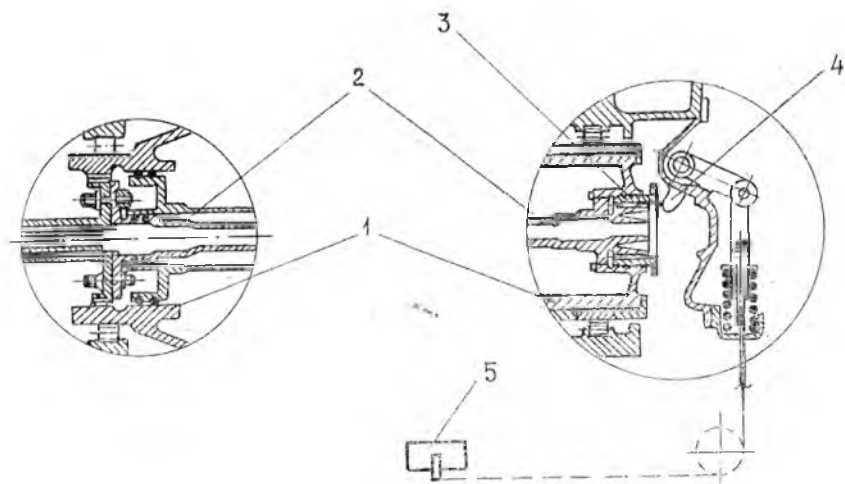


Рис. 4.3. Схема механизма отсечки топлива при поломке вала ротора низкого давления ТРДД, Спей, фирма «Роллс-Ройс» [4]: 1 — вал ротора низкого давления; 2 — трубка в передней части, жестко закрепленная с валом; 3 — резьбовая пробка, посаженная на шлицы трубки и ввинченная в конец вала ротора; 4 — рычаг; 5 — отсечной топливный край

6. Выполнение требуемых запасов работоспособности изделия в целом и его элементов в отдельности.

В настоящее время все эти требования установлены директивными документами институтов ВВС, МГА и МАП, изложенными в стандартах «Нормы летной годности самолетов СССР—НЛГС-2». Коэффициенты запасов прочности для ЛА и двигателей определены нормативами институтов ЦАГИ и ЦИАМ.

7. Статическая определимость силовых схем конструкций; наименьшие температурные деформации.

8. Модульность конструкций; панелирование и агрегатирование монтажей в ЛА.

9. Резервирование (дублирование) конструкций агрегатов и систем.

Примерами выполнения этого требования в конструкциях ЛА являются дублирование перекачивающих и подкачивающих топливных насосов, трехкратное резервирование управления горизонтальными и вертикальными рулями.

В двигателях вследствие ограничений по схемной и массовой избыточности дублирование используется реже. Однако в системах автоматического флюгирования воздушных винтов заложено многократное резервирование.

10. Высокая ремонтно-эксплуатационная технологичность конструкции.

Выполнение этого требования обусловлено принадлежностью ЛА и двигателей к классу дорогостоящих устройств многократного применения с обязательным периодическим обслуживанием.

С целью снижения прямых эксплуатационных расходов (ПЭР) при проектировании изделий АТ стремятся обеспечить их контролепригодность и взаимозаменяемость в эксплуатации, свободу подходов к элементам регулирования, возможность механизации и автоматизации часто выполняемых при техническом обслуживании операций.

11. Унификация и стандартизация конструкций изделий и их элементов.

Унификация и стандартизация конструкций изделий и их элементов является одним из главных факторов повышения надежности авиационной техники.

Унификация — рациональное сокращение числа типов и размеров изделий одинакового функционального назначения.

Стандартизация — организационное законодательное закрепление наилучших решений, достигнутых методами унификаций продукции серийного или массового производства.

Такие решения сведены в стандарты СССР (ГОСТы), отраслевые стандарты (ОСТы) и стандарты предприятий (СТП).

В ряде случаев конструктор руководствуется международными стандартами. Для авиаконструктора это стандарты



ИКАО — Международной гражданской авиации и стандарты СЭВ — Совета Экономической Взаимопомощи социалистических стран.

Важнейшим в унификации является конструктивная преемственность — заимствование деталей и элементов из ранее созданных изделий. Это оценивается коэффициентом унификации

$$K_{\text{ун}} = \frac{N_{\text{уд}}}{N_{\text{од}}},$$

где  $N_{\text{уд}}$  — количество унифицированных деталей;

$N_{\text{од}}$  — общее число деталей в изделии.

Рассматриваются также  $K_{\text{ун}}$  по трудоемкости изготовления, количеству дефицитных материалов.

В процессе проектирования авиационной техники реализуются четыре направления стандартизации и унификации. Например, при создании авиационных ГТД используются:

1. Стандартизация идей (стандартизируются методы расчетов и проектирования, испытаний и оценки параметров и запасов работоспособности двигателей и ЛА).

Отраслевыми институтами созданы серии руководств по конструированию, нормам прочности, специальным испытаниям двигателей и ЛА. Примерами таких стандартов являются «Нормы летной годности самолетов СССР ИЛГС-2», «Требования к контролепригодности двигателей», «Нормы прочности ГТД».

2. Стандартизация конструкций деталей агрегатов, сборочных единиц, технологий изготовления.

3. Широкая применяемость одних и тех же высокоэффективных двигателей на различных ЛА.

4. Создание высоконадежного, прогрессивного по параметрам базового газогенератора и развитие на его основе семейства двигателей. (Направление получило развитие в связи с распространением двух- и трехвальных двигателей).

Газогенератор — самая напряженная часть двигателя ( $T_{\text{г}}^* \approx 1600—1700 \text{ К}$ ,  $p_{\text{г}}^* = 30—40$ ,  $n_{\text{г}} = 7000—8000 \text{ об/мин}$ ,  $U_{\text{к}} \approx 400 \text{ м/с}$ ) — тщательно обрабатывается, чем обеспечивается высокая надежность семейства двигателей, использующих один и тот же газогенератор.

На рис. 4.4 показана схема семейства двигателей разных типов на основе базового генератора.

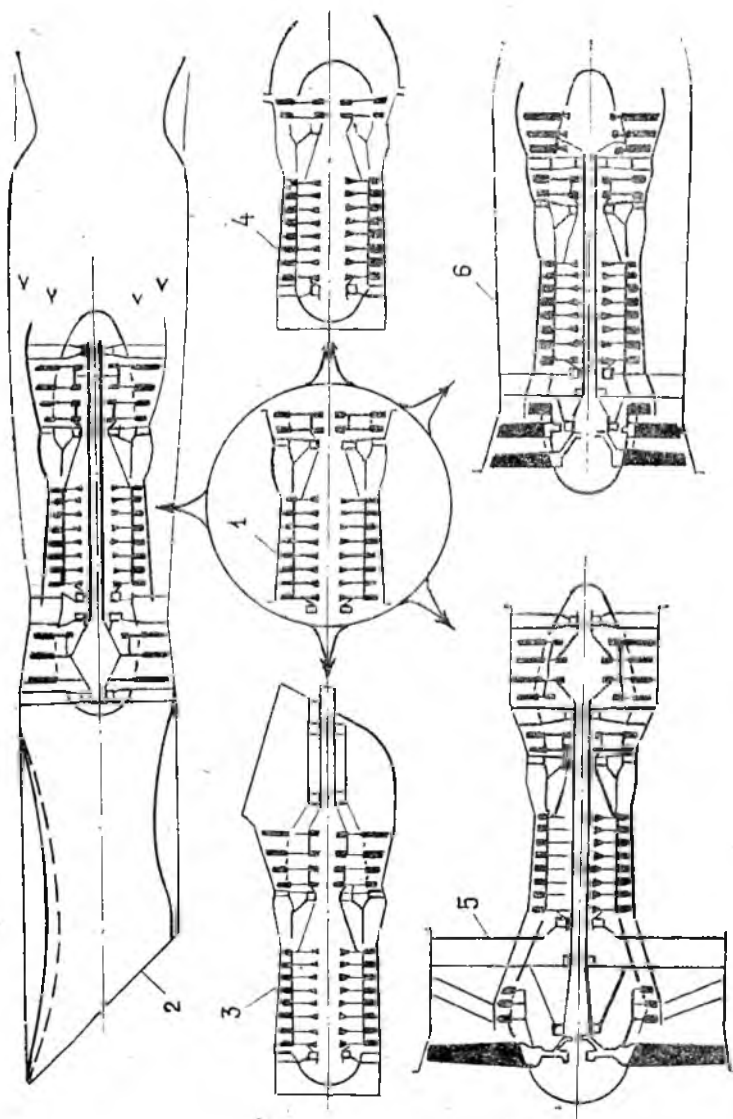


Рис. 4.4. Схема семейства двигателей разных типов на основе базового генератора: 1 — базовый газогенератор; 2 — двухконтурный турбореактивный двигатель с форсажной камерой для СПС; 3 — турбовальный ГТД; 4 — турбореактивный двигатель; 5 — ТРДД с большой степенью двухконтурности; 6 — ТРДД с малой степенью двухконтурности

#### **4.2. КОНСТРУКТОРСКАЯ ОТРАБОТКА (ДОВОДКА) ОПЫТНЫХ ИЗДЕЛИЙ. ИСПЫТАНИЯ ПО ПРОВЕРКЕ ИХ НАДЕЖНОСТИ**

За этапом проектирования следует конструкторская отработка (так называемая доводка) изделий, в процессе которой кроме работ, направленных на достижение заданных технических параметров, проверяется и обеспечивается надежность изделий.

Рассмотрим эту работу на основе конструкторской отработки двигателей.

Организация основных работ, выполняемых в процессе создания нового или модифицированного двигателя, показана на рис. 4.5.

Начальным этапом всего процесса является проектирование, конечным — государственные испытания (предъявление госкомиссии для испытания на заявленные параметры и надежность всех материалов по созданию нового двигателя) и эталонирование технической документации.

Особенностями проектирования и доводки современных авиадвигателей являются [4]:

1. Обязательное использование при проектировании результатов тщательного анализа показателей надежности в процессе широкой эксплуатации серийных двигателей — прототипов.

2. Значительное изменение при доводке первоначальной конструкции вновь проектированного двигателя. Каждый чертеж изменяется в среднем 5 раз.

3. Использование прогрессивных методов доводки современных двигателей, значительно повышающих их надежность: полузловая доводка; большое количество специальных испытаний; внедрение эквивалентных (ускоренных) ресурсных испытаний.

Большая длительность доводки (4—6 лет).

На доводку затрачиваются 30—50 новых двигателей, суммарная наработка на стендах и самолетах составляет 15000—20000 часов. Стоимость доводки достигает многих десятков миллионов рублей.

Такие затраты объясняются, с одной стороны, высокими требованиями к уровню параметров и критериям надежности двигателей, с другой стороны — серьезным отставанием теории авиадвигателестроения в вопросах создания методик достоверных инженерных расчетов параметров рабочего процесса, а также вибрационной прочности и долговечности основных деталей двигателей.

*Специальные испытания по проверке запасов работоспособности* назначаются на основании длительного опыта. При этом руководствуются тремя признаками:

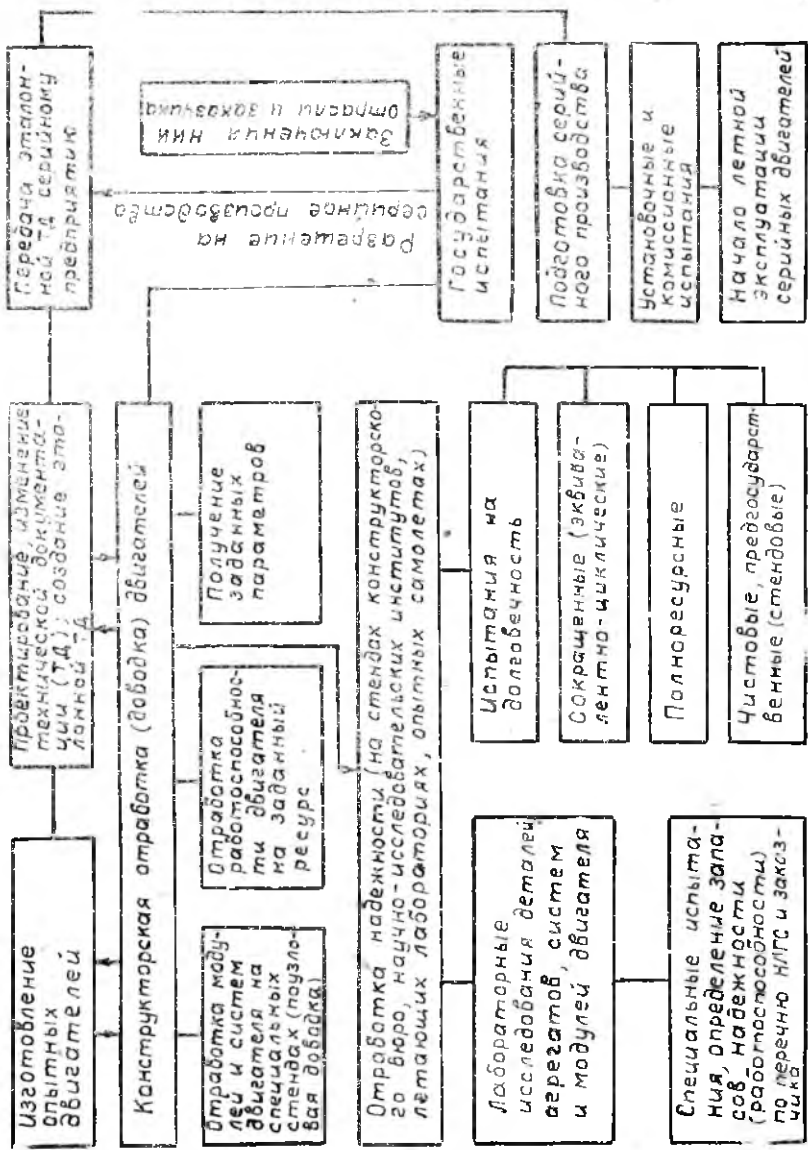


Рис. 4.5. Отработка надежности при создании нового или модифицированного авиадвигателя

I. Специальными испытаниями проверяются запасы работоспособности в связи с характерными наиболее часто встречающимися отказами. К таким отказам следует отнести усталостные поломки лопаток, потерю запасов газодинамической устойчивости (ГДУ), неудачные запуски, повреждения лопаток посторонними предметами, обледенение входных элементов, перегрев лопаток турбины.

II. Тяжесть последствий отказа, даже маловероятного. Примером специальных испытаний, включаемых в перечень по этому признаку, являются: испытание на разрушение дисков под действием центробежных сил, испытание корпуса двигателя на непробиваемость при разрушении элементов ротора.

III. Специальные испытания, связанные не с конкретным отказом, а с неясностью поведения изделия при тех или иных внешних воздействиях. Примером такого специального испытания являются проверка двигателя при увеличенной на 3% частоте вращения ротора, когда требуется в условиях, вполне возможных, оценить функционирование двигателя (выявляются непредсказуемые последствия: помпаж, резонансные напряжения в лопатках, критические скорости ротора и т. п.).

Ниже приведен перечень специальных испытаний современных газотурбинных двигателей (основные виды, отраженные в нормах летной годности самолетов СССР).

1. Вибрографирование двигателя (корпус).
2. Тензометрирование лопаток компрессора и турбины; проверка на отсутствие автоколебаний лопаток.
3. Проверка двигателя при максимальных температурах газа, возможных в эксплуатации.
4. Испытание дисков роторов на разрушение от центробежных сил.
5. Проверка непробиваемости корпуса при разрушении лопаток.
6. Проверка работоспособности двигателя при попадании птиц, льда, воды, песка.
7. Определение запаса газодинамической устойчивости.
8. Испытания двигателя при повышенных на 3% частотах вращения ротора.
9. Испытания системы запуска.
10. Испытания систем автоматического флюгирования, реверсирования.
11. Испытание системы пожаротушения.

Проверка надежности двигателя за время выработки ресурса может осуществляться длительными стендовыми испытаниями по эксплуатационной программе, т. е. программе, отражающей в натуральном масштабе времени режимы работы и нагрузки в типичных условиях эксплуатации. Но при величинах ресурса,

равных нескольким тысячам часов, стендовые испытания, длительность которых соответствует заданному ресурсу в эксплуатации, занимают большие отрезки времени (многие месяцы и даже годы). Такие испытания практически неприемлемы, они заменяются ускоренными стендовыми испытаниями, эквивалентными заданному ресурсу в эксплуатации по исчерпанию долговечности основных узлов и деталей.

В настоящее время разработаны методики определения режимов ускоренного повреждения основных деталей ГТД — рабочих и направляющих лопаток, дисков, зубчатых шестерен, подшипников роторов при, по-существу, всех видах нагрузок: длительных статических, циклических, усталостных (изгибных и контактных). Получены временные зависимости между уровнями нагрузок и долговечностью, подтверждена идентичность повреждения деталей при ускоренных эквивалентных испытаниях и в процессе обычной эксплуатации на полный ресурс [14].

Календарное время ускоренных испытаний в 3—5 раз меньше времени длительных испытаний на полный ресурс. Экономятся также значительные средства.

При ускоренных испытаниях путем использования наиболее тяжелых режимов добиваются за короткое время такой же повреждаемости деталей, какую они имеют за все время выработки полного эксплуатационного ресурса.

Методики приведения эксплуатационного режима к режиму ускоренного эквивалентного испытания для лопаток турбины ГТД при действии статических и динамических нагрузок изложены в работах [14, 16]. На рис. 4.6 показаны зависимости предела длительной прочности материала лопаток от времени действия статической нагрузки.

Предел длительной прочности  $\sigma_{b,t}^{t^{\circ}C}$  — это постоянное напряжение, приложенное к образцу или детали при постоянной температуре и приводящее к их разрушению в течение заданного

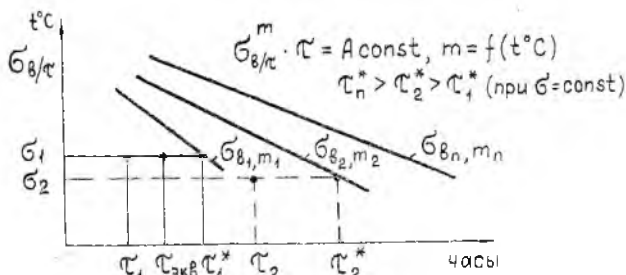


Рис. 4.6. Зависимость предела длительной прочности от наработки: 1 — режим приведения; 2 — эксплуатационные режимы (приводимые режимы)

промежутка времени. Время до разрушения и действующее напряжение связаны зависимостью

$$(\sigma_{b^*}^t)^m \tau = A,$$

где  $A$  и  $m$  — постоянные коэффициенты, зависящие от свойств материала и уровня температуры детали.

Чем ниже температура и рабочее напряжение детали, тем больше ее долговечность — время до разрушения;  $\tau_n^* > \tau_2^* > \tau_1^*$ .

В предположении линейного суммирования повреждений влияние различных режимов нагружения на истощение долговечности (длительной прочности) оценивается следующим образом (рис. 4.6).

Степени повреждения детали на различных режимах характеризуются отношениями  $\frac{\tau_1}{\tau_1^*}$ ,  $\frac{\tau_2}{\tau_2^*}$ , ...,  $\frac{\tau_n}{\tau_n^*}$ : в числителе — время работы детали на данном режиме по эксплуатационной программе, в знаменателе — время до разрушения детали при непрерывной работе на данном режиме.

Истощения долговечностей при работе на каждом эксплуатационном режиме только в течение часа будут

$$\frac{1}{\tau_1}, \frac{1}{\tau_2}, \dots, \frac{1}{\tau_n}.$$

Если обозначить доли наработки на отдельных режимах при суммарной наработке в один час через  $C_1, C_2, \dots, C_n$  ( $C_1 + C_2 + \dots + C_n = 1$ ), то каждый режим в течение часа комбинированных испытаний истощает соответствующие доли ресурса:

$$\frac{C_1}{\tau_1}, \frac{C_2}{\tau_2}, \dots, \frac{C_n}{\tau_n}.$$

Всего за один час будет истощена долговечность

$$\frac{C_1}{\tau_1} + \frac{C_2}{\tau_2} + \dots + \frac{C_n}{\tau_n} = \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{\tau_i}.$$

Эквивалентное время (при данной комбинации эксплуатационных режимов)  $\tau_3$  определяется по формуле

$$\sum_{i=1}^n \frac{C_i}{\tau_i} = \frac{1}{\tau_3}.$$

Ускоренные эквивалентные испытания выполняются обычно на одном максимальном режиме работы двигателя. Если эти испытания являются комбинацией нескольких ( $z$ ) режимов, то

для обеспечения эквивалентности условий испытаний режимам эксплуатации необходимо соблюдать равенство

$$\sum_1^n \frac{C_i}{\tau_i} = \sum_1^z \frac{C_{iэ}}{\tau_{iэ}}$$

В табл. 4.1. приведены распределение эксплуатационных режимов, рабочие напряжения, температуры лопатки одного из отечественных двигателей. Долговечности  $\tau_i$  материала лопатки (в рассматриваемом случае — ЖС6КП) найдены по кривым длительной прочности, полученным при экспериментальном исследовании.

Таблица 4.1

Данные для расчета эквивалентной долговечности лопатки турбины

Режимы	$t, ^\circ\text{C}$	$\sigma_{\Sigma}, \text{МПа}$	$K_m \sigma_{\Sigma}, \text{МПа}$	$C_i$	$\tau_i, \text{r}$
Максимальный	850	128	340	0,02	200
Номинальный	800	121	320	0,21	2300
0,85-номинального	760	113	300	0,35	26500
0,7 номинального	730	104	275	0,17	$10^5$
0,6 номинального	710	98	260	0,12	$10^5$
0,4 номинального	650	83	220	0,09	$10^5$
Малый газ	450	41	109	0,03	$10^5$

На основании этих данных определены условия эквивалентных испытаний (рис. 4.7), выполняемых на одном максимальном режиме (кривая 2, полученная в предположении  $C_i = 1$  для этого режима). Для ресурса 5000 часов эквивалентное время работы на максимальном режиме составляет 140 часов (при коэффициенте запаса прочности  $K_m \approx 2,7$ ).

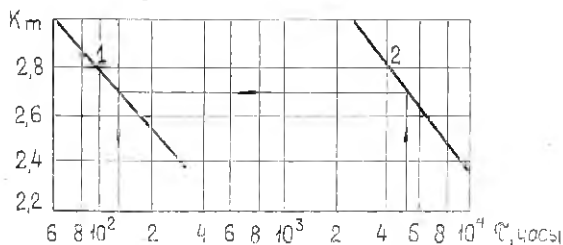


Рис. 4.7. Долговечность лопаток в зависимости от коэффициента запаса: 1 — эквивалентная наработка на максимальном режиме (режим приведения); 2 — эксплуатационная программа [14]



Такой же расчет эквивалентной наработки выполняется для других теплонапряженных деталей. Время максимального режима в эквивалентной программе устанавливается по детали, лимитирующей ресурс.

В работах [14, 16] приводятся также зависимости для определения режимов эквивалентных испытаний деталей ГТД, подверженных малоцикловой усталости, а также высокочастотным контактными и изгибным переменным напряжениям. Однако на практике эти виды нагружения при ускоренных испытаниях учитываются прямым воспроизведением числа циклов нагружения. С этой целью в программу ускоренных испытаний включают кроме наработки на максимальном режиме наработку при частотах вращения, на которых имеются резонансные колебания лопаток, а также наработку при критических (для ротора) частотах вращения. Воспроизводятся переходные режимы за ресурс: запуски, в том числе холодные, с выходом на максимальный режим, приемистости и сбросы газа с выдержкой на максимальном режиме и малом газе, реверсирование тяги.

В качестве примера в табл. 4.2 даны режимы ускоренного эквивалентного испытания турбореактивного двухконтурного двигателя за ресурс 5000 часов.

Таблица 4.2

Режимы эквивалентного испытания ТРДД за 5000 часов

Режимы	1 этап	140 этапов	Режимы	1 этап	140 этапов
Максимальный	1 ч	140 часов	Запуски	26	3640
На резонансных площадках	По 22 мин	51 час 20 мин	Перекладка реверса на малом газе	13	1820
Приемистости	39	5460			
Выходы на максимальную отрицательную тягу	13	1820	Продолжительность испытаний	6 ч	840 ч

На исчерпание долговечности лопаток и дисков авиационных ГТД оказывают значительное влияние следующие эксплуатационные факторы: температура воздуха на входе в двигатель; индивидуальные особенности двигателей; принципы пилотирования.

Так, для одного из ТРДД изменение температуры воздуха на входе от 0 до 30°C приводит к увеличению температуры газа перед турбиной на 100 К и уменьшению ресурса турбины по статической прочности более, чем в 100 раз. Разброс параметров различных двигателей при работе на одном режиме (например,

частот вращения роторов в пределах депусков) вызывает разницу в исчерпании ресурса лопаток двигателей примерно в 5 раз.

Принципы пилотирования включают в себя несколько факторов: регламент прогрева двигателя, изменение режимов работы (циклирование) в полете и при посадке, выбор режима взлета. Они во многом определяют циклическую прочность деталей, в особенности дисков турбины. Поэтому для экономного расходования ресурса рекомендуется пилотирование с возможно меньшим числом переменных режимов.

Наибольшее исчерпание статической прочности происходит на взлетном режиме. Продолжительность работы на этом режиме не должна превышать установленные нормы, а при неполной загрузке самолета рекомендуется выполнять взлет на номинальном режиме.

## **5. ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ИЗДЕЛИЙ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ В ПРОЦЕССЕ СЕРИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА**

Высокий уровень проектно-конструкторской документации, хорошие результаты конструкторской отработки изделия еще не гарантируют надежной работы в эксплуатации, если при изготовлении изделия не будет обеспечена его высокая надежность.

Анализ статистических данных показывает, что от 30 до 50% отказов изделий в эксплуатации вызываются причинами производственного характера. Этому способствует практически постоянное обновление продукции в связи с высокими темпами развития авиационной техники.

Производство и широкая эксплуатация серийных изделий отличаются от производства и испытаний опытных изделий большим количеством продукции, расширением сферы применения, участием в работе над авиатехникой новых коллективов, где могут быть и работники с недостаточной квалификацией, более жесткими экономическими требованиями.

Под воздействием этих особенностей появляются факторы, существенно снижающие надежность серийных изделий: возможность неблагоприятных сочетаний размеров и характеристик деталей и узлов в одном изделии; экстремальные эксплуатационные условия, отсутствовавшие при летных испытаниях опытных изделий; отличие ряда технологических процессов в серийном и опытном производствах; необходимость изменения технологии в серийном производстве с целью улучшения экономиче-

ских показателей; недостаточная стабильность производственных процессов и низкая квалификация некоторых исполнителей в начальный период выпуска изделий.

Первые два фактора способствуют проявлению отказов и неисправностей конструктивного характера, остальные, как правило, являются причинами производственных дефектов.

Экстремальные условия эксплуатации могут появиться вследствие климатических аномалий (наибольшие, очень резкие отклонения температуры, давления и влажности воздуха), а также чрезмерно частого использования изделий при максимальных силовых и тепловых нагрузках. Эти условия по-отдельности учитываются при испытаниях опытных изделий. Однако комбинации экстремальных условий, возможные в последующей широкой эксплуатации серийных изделий, предусмотреть в процессе создания новых изделий практически не удастся. Кроме того, в процессе конструкторской отработки изделия сведения о профилях полетов летательных аппаратов и их местонахождении являются ориентировочными. Поэтому могут появиться непредвиденные условия эксплуатации, при которых надежность серийных изделий снижается.

Изготовление ряда ответственных деталей авиационных изделий на серийном предприятии производится по технологии, отличной от технологии опытного предприятия. Это объясняется спецификой оборудования предприятий, а также необходимостью непрерывного повышения экономических показателей серийного производства. Освоение в серийном производстве новых изделий в сжатые сроки может в начальной стадии приводить к отставанию в оснащении производства необходимым оборудованием и в подготовке квалифицированных работников.

При действии в производстве перечисленных факторов обеспечение высокой надежности изделий затруднено. В этих условиях могут возникать на выпускаемых изделиях сложные дефекты, невыявленные в процессе доводки и летных испытаний опытных изделий. Возникновение таких дефектов является объективно-закономерным, вероятность же их проявления, как правило, малая, не более 5%. Поэтому исследование и устранение таких дефектов в условиях непрерывности производства и эксплуатации изделий являются трудоемкими научно-техническими задачами.

Обеспечение высокой надежности серийных изделий авиационной техники заключается в создании и применении двух эффективных систем — системы управления качеством изделий в производстве и эксплуатации и системы исследования и устранения причин отказов изделий.

Система управления качеством изделий включает три направления:

обеспечение высокой конструкционной прочности деталей на основе использования новых материалов и совершенствования процессов проектирования, производства и эксплуатации;

применение различных методов контроля в производстве и диагностирования состояния изделий в эксплуатации;

повышение точности и стабильности изготовления деталей и узлов путем исследования и регулирования технологических процессов.

На предприятиях, КБ и НИИ МАП СССР, а также в эксплуатационных подразделениях МГА и ВВС имеются специальные службы — отделы надежности и диагностики изделий.

Эти службы проводят все работы по обеспечению заданного уровня надежности изделий, осуществляют постоянную связь эксплуатирующих организаций с предприятиями, что дает возможность постоянно совершенствовать изделия на всех этапах их жизненного цикла.

### **5.1. КОНСТРУКЦИОННАЯ ПРОЧНОСТЬ ДЕТАЛЕЙ. ПРИМЕРЫ ПОВЫШЕНИЯ ПРОЧНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ**

Под конструкционной прочностью понимается прочность деталей в реальных условиях эксплуатации с учетом геометрических, металлургических и технологических факторов [11].

Конструкционная прочность деталей определяется уровнем свойств материала, конструкции и расчетов на прочность, технологии изготовления, эксплуатации, научной разработки проблем прочности.

Достаточность уровня конструкционной прочности практически оценивается отсутствием дефектов на деталях всех изделий, выпускаемых производством, в условиях эксплуатации в пределах установленного ресурса.

Появление существенных дефектов в более ранний период эксплуатации на одном или нескольких изделиях говорит о пониженном уровне конструкционной прочности детали, на которой проявился дефект.

Повышение параметров рабочего процесса изделия или системы приводит к более высоким требованиям, предъявляемым к конструкционной прочности деталей. В производстве этот параметр зависит от свойств материалов, методов получения заготовок, совершенства техпроцессов механической обработки, применения операций поверхностного упрочнения. Уровень конструкционной прочности снижается в случае образования в процессе изготовления вредной технологической наследственности.

Технологическая наследственность будет вредной тогда, когда в результате некоторых технологических операций на поверхности детали образуется слой, имеющий остаточные напряжения растяжения или (и) низкую пластичность, а при последующих операциях эти слои полностью не удаляются. Прочность детали при этом снижается.

Снижение прочности детали в сравнении с прочностью исходного материала на стандартных образцах может произойти и по всему сечению детали в результате неотлаженных операций литья, штамповки, термообработки.

В настоящее время имеется комплекс технологических методов повышения конструкционной прочности деталей.

Примеры повышения прочности деталей авиационных ГТД технологическими методами

*Повышение конструкционной прочности заготовок лопаток.*

На рис. 5.1 приведены результаты испытания на усталостную прочность круглых образцов из сплава ЭИ-718, применяемого для компрессорных лопаток ГТД. Образцы имеют зерна различных размеров в зависимости от вида штамповки. Наибольшую выносливость имеют мелкозернистые образцы, полученные изотермической или высокоскоростной штамповкой. При этом предел выносливости увеличивается на 60% в сравнении с крупнозернистой объемной штамповкой.

Модифицирование сплавов, применяемых для лопаток турбины, позволяет увеличить их пластичность на 40—50%, предел усталости на 20—25%, термоциклическую стойкость в 1,5—2 раза. Модификатор — сплав на кобальтовой основе — вводится в расплав, вследствие чего на поверхности оболочковой формы образуются многочисленные центры кристаллизации. В результате заготовка имеет мелкое зерно.

Повышение прочности литых лопаток турбины достигается также методом направленной кристаллизации. В этом случае организуется однонаправленный отвод тепла от формы с жидким металлом. При этом исключаются границы зерен, перпендикулярные направлению действия центробежных сил, а по таким границам зерен в первую очередь начинается образование микротрещин. Пластичность лопаток повышается в 2—3 раза, термоциклическая стойкость в 1,5—2 раза, на 20% увеличивается длительная прочность.

Аналогичные работы ведутся при совершенствовании технологических процессов получения заготовок всех ответственных деталей изделий авиационной техники.

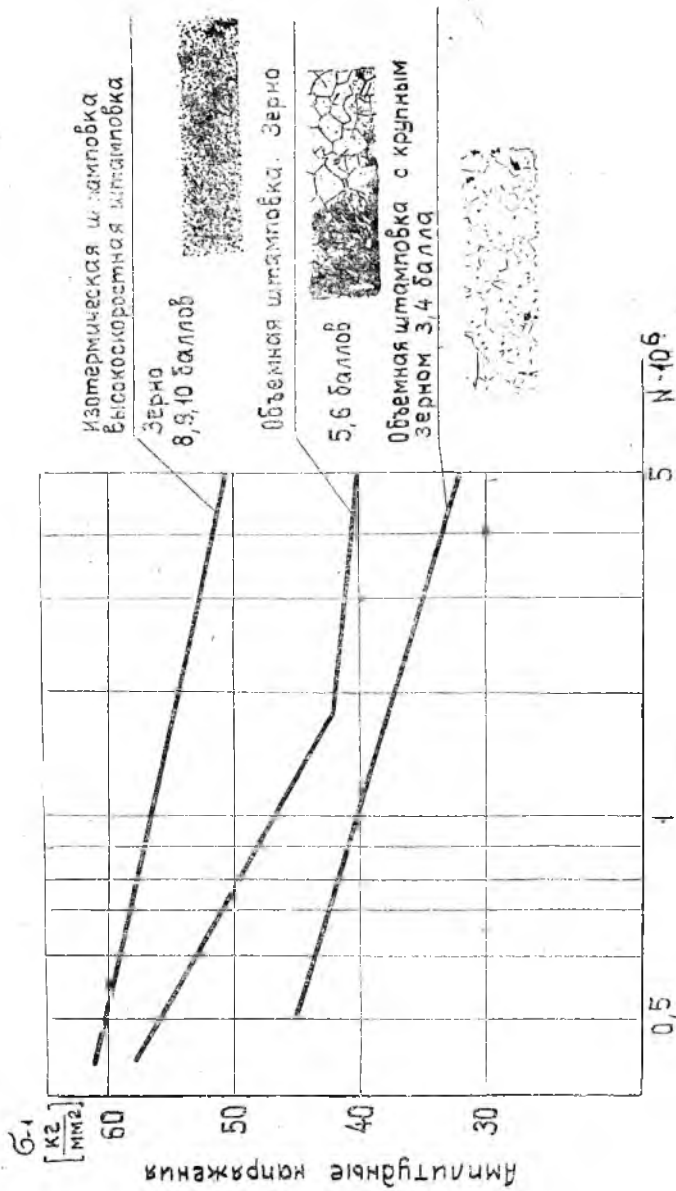


Рис. 5.1. Влияние способа получения заготовок на выносливость лопаток из сплава ЭИ-718

Повышение конструкционной прочности окончательно изготовленных деталей методами поверхностно-пластической деформации (ППД).

На рис. 5.2. приведена зависимость выносливости детали от уровня возникающих в ней статических напряжений.

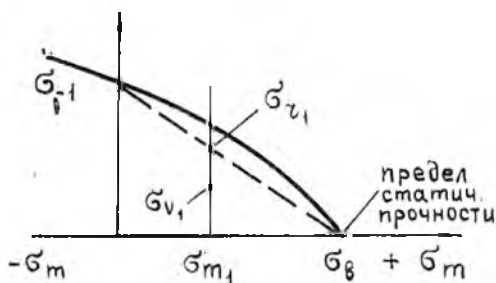


Рис. 5.2. Зависимость выносливости детали от уровня статического напряжения

Коэффициент запаса по усталостной прочности детали ( $K_V$ ) определяется по формуле

$$K_V = \frac{\sigma_{-1} - \Psi \sigma_m}{\sigma_V},$$

где  $\sigma_{-1}$  — предел выносливости при симметричном ( $\sigma_m = 0$ ) цикле;

$\sigma_m, \sigma_V$  — статические и переменные напряжения в детали;

$\Psi$  — коэффициент асимметрии цикла,  $\Psi = \lg \alpha$  ( $\alpha$  — угол наклона прямой напряжений).

Чем больше растягивающие напряжения ( $\sigma_m$ ) на поверхности детали, тем меньше коэффициент запаса и тем быстрее наступит усталостное разрушение. Сопротивляемость этому разрушению можно увеличить в случае, если в поверхностном слое будут остаточные напряжения сжатия. Методы ППД применяются при изготовлении лопаток, дисков, валов и подшипников, шестерен, лопастей винтов, лонжеронов силовых элементов, подмоторных рам, деталей шасси и других деталей.

На неотлаженных операциях точения, фрезерования, шлифования образуются высокие напряжения растяжения, снижающие выносливость деталей. Для устранения этого при обработке технологического процесса выполняются исследования параметров поверхностного слоя деталей — определение величины и знака остаточных напряжений, степени наклепа, уровня шероховатости, микрорельефа. Все это позволяет выбрать и назначить оптимальные в отношении прочности детали и производительности операции — режимы обработки, величину припуска, вид и геометрию инструмента, скорости резания, параметры охлаждающей жидкости.

Выбранный технологический процесс обеспечивает на поверхности малые остаточные напряжения растяжения или их полное отсутствие.

Заключительной операцией является упрочнение деталей методами поверхностно-пластического деформирования (ППД). Этим обеспечиваются образование в поверхностном слое остаточных напряжений сжатия и значительное снижение шероховатости поверхности.

В настоящее время наиболее распространены методы ППД: полирование, пневмогидродробеструйная обработка, виброгалтовка, обкатка роликами, алмазное выглаживание, обдувка микрошариками, термопластическое упрочнение.

На рис. 5.3 показана эффективность некоторых видов ППД. Наряду с формированием сжимающих остаточных напряжений происходит деформационное упрочнение (наклеп). В условиях эксплуатации деталей при высоких температурах наклеп приводит к заметному снижению прочностных свойств, благоприятное же влияние напряжений сжатия резко снижается в связи с их релаксацией. Поэтому для повышения прочности турбинных лопаток авиадвигателей применяется метод термопластического

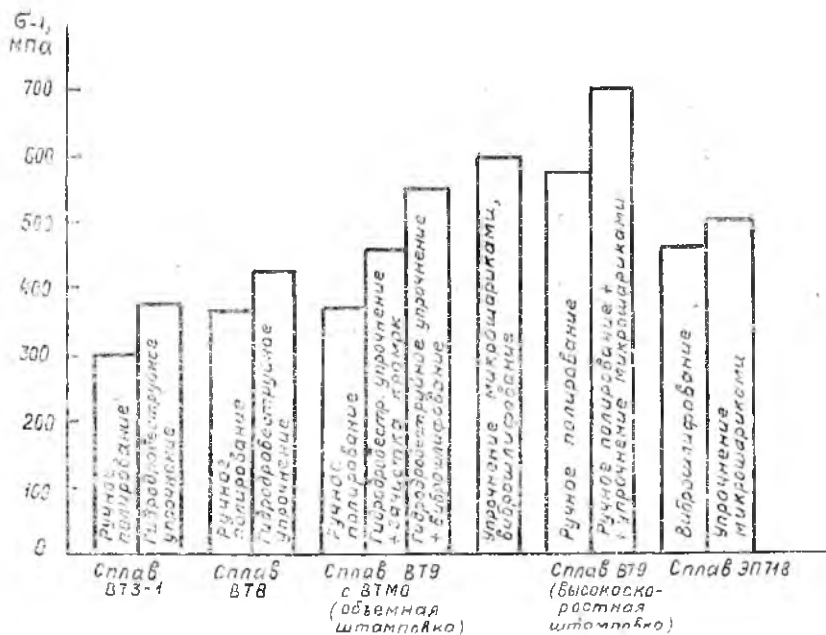


Рис. 5.3. Выносливость лопаток осевого компрессора ГТД после упрочнения ( $N_b = 20 \times 10^6$ ,  $t = 20^\circ \text{C}$ )



упрочнения (ТПУ), при котором в поверхностном слое детали формируются остаточные напряжения сжатия при наклепе малой интенсивности.

На рис. 5.4 показана схема установки для термопластического упрочнения турбинных лопаток. Метод ТПУ заключается в нагреве детали и последующем быстром душемом охлаждении. В поверхностном слое при этом формируются остаточные напряжения сжатия при незначительном наклепе. Нагрев осуществляется до температуры термопластических деформаций ( $\sim 700^{\circ}\text{C}$ ), температура структурно-фазовых превращений не превышает.

При душемом способе охлаждения поверхностные слои нагретой детали благодаря малой теплопроводности резко сжимаются, в них появляются растягивающие напряжения, превышающие предел упругости. Максимальная пластическая деформация растяжения образуется на поверхности, здесь же находится и максимум остаточных сжимающих напряжений, возникающих после остывания детали.

## **5.2. СИСТЕМА ПРЕДУПРЕДИТЕЛЬНОГО КОНТРОЛЯ С ЦЕЛЬЮ ПРОФИЛАКТИКИ КАЧЕСТВА И НАДЕЖНОСТИ ИЗДЕЛИЙ**

Учитывая высокую сложность и большую трудоемкость деталей авиационных изделий, важно обеспечить контроль всех этапов технологического процесса, чтобы иметь возможность своевременно воздействовать на этот процесс. Контроль же, осуществляемый после того, как деталь, узел или агрегат уже изготовлены, не может улучшить их качество, а лишь позволяет изъять дефектные элементы. Поэтому в производстве действует специальная система предупредительного контроля. Примерами такого контроля являются: входной контроль; технологические запасы (запасы точности); комплекс методов неразрушающего контроля.

*Входной контроль* призван не допустить использования некондиционных материалов, заготовок, готовых изделий, получаемых от поставщиков — смежников, его основная цель — выявление и контроль признаков качества, специфичных для частных условий применения. Наиболее характерным для авиационных предприятий является входной контроль материалов покупных деталей и агрегатов.

Задачи входного контроля материалов:

выбор плавок материала с более высокими (в пределах ТУ на поставку) свойствами для наиболее ответственных деталей;

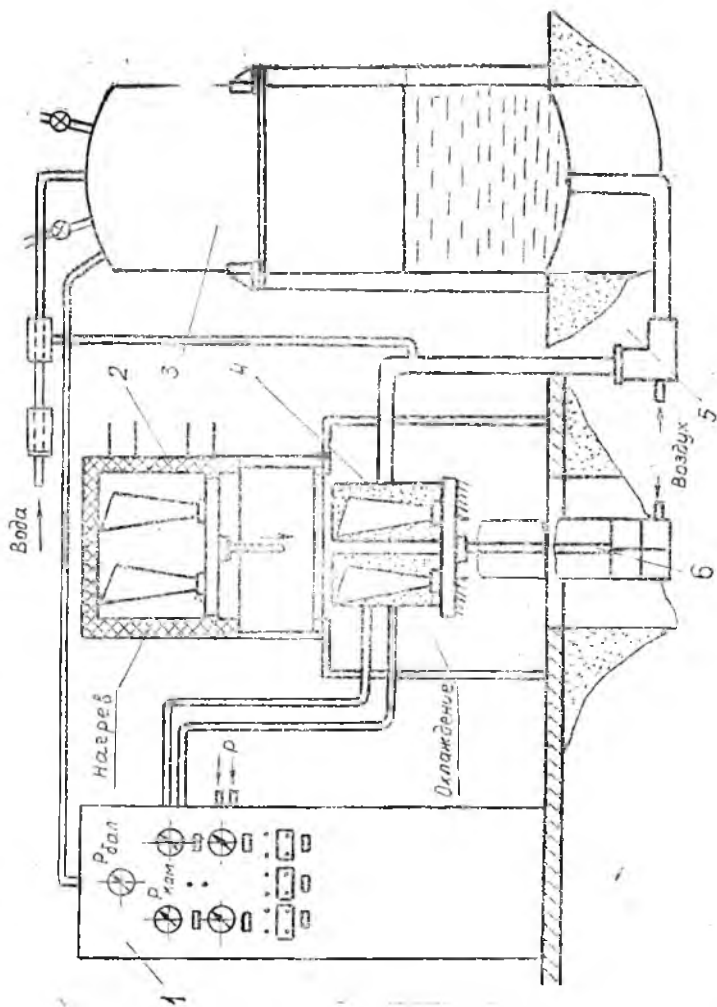


Рис. 5.4. Термопластическое упрочнение лопаток турбины ГТД: 1 — шиток; 2 — электрическая печь; 3 — баллон; 4 — решетка; 5 — пневмоклапан; 6 — механизм транспортировки лопаток

сопоставление характеристик материала и готовых деталей; периодическое подтверждение кондиционности и оценка стабильности характеристик материала;

получение данных о необходимости предъявления дополнительных требований к качеству материала.

Главное значение входного контроля (а ему, следует повторить, подвергаются и готовые изделия, полученные от поставщиков, т. е. не только материалы) в том, что он позволяет воздействовать на процесс производства на самом раннем этапе. Он позволяет не допустить изготовления из некондиционных материалов, покупных изделий и агрегатов.

*Технологические запасы* (их применениис обосновано Н. Д. Кузнецовым и Н. Я. Гуревичем) призваны обеспечивать гарантированное получение в процессе производства заданных значений конструктивных параметров. Производственные допуски назначаются меньше, чем конструктивные. Технологический процесс проектируется с расчетом всех погрешностей изготовления, с тем, чтобы между возможным отклонением конструктивного параметра и его регулируемым значением оставался бы некоторый запас.

Технологические запасы, разумеется, назначаются только на наиболее важные геометрические параметры, отклонение которых за границы поля допуска влияет на надежность изделия.

*Методы неразрушающего контроля.* Выполнение ряда требований к ответственным деталям (лопасти винтов, лонжероны, силовые кронштейны и болты самолетов, лопатки и диски ГТД и др.) невозможно проконтролировать только по результатам определения их размеров и формы. Для выявления поверхностных дефектов типа микротрещин (начиная с трещин шириной 0,001 мм и глубиной 0,01 мм) пор, рыхлот используют так называемые капиллярные методы.

Типичный метод такого рода — люминесцентный контроль, основанный на регистрации свечения флуоресцирующей индикаторной жидкости, проникающей в полости дефектов при облучении ультрафиолетовыми лучами.

Для обнаружения раковин, рыхлот, неметаллических и шлаковых включений применяются радиационные методы контроля (рентгеновский метод). Акустические методы, основанные на регистрации упругих колебаний, возникающих в контролируемых деталях, применяют для определения несплошностей, структурного анализа материала (например, размера зерен), измерения толщины при одностороннем доступе к деталям.

Находят применение также магнитные и электромагнитные (вихревых токов) методы неразрушающего контроля.

### 5.3. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЧИН ОТКАЗОВ СЕРИЙНЫХ ИЗДЕЛИЙ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИЧИН ОТКАЗОВ

Отдел надежности предприятия на основании информации о неисправностях и отказах изделий: учета неисправностей, рекламационных актов, протоколов и отчетов стендовых и летных испытаний изделий, журналов регистрации отклонений от требований технической документации в процессе производства — разрабатывает и организует (с участием других подразделений предприятия) выполнение программы исследований, анализирует их результаты, составляет отчеты о выполненной работе и заключения о причинах появления дефектов. Эти материалы являются основой для разработки планов мероприятий с целью устранения причин появления неисправностей и отказов изделий на всех этапах их производства и эксплуатации. После реализации и подтверждения эффективности мероприятий отделом надежности составляется заключение об устранении дефекта.

*Методика исследования причин отказов серийно выпускаемых изделий.* Серийное производство авиационных изделий, как указывалось, имеет ряд особенностей: большое количество непрерывно изготавливаемых и эксплуатируемых изделий; существенные отличия в условиях эксплуатации различных групп изделий; участие в работах над изделиями многих организаций, в которых могут быть и работники с недостаточной квалификацией; возможное противоречие между ростом экономических показателей производства и повышением качества изделий.

Вследствие этих особенностей могут проявляться факторы, снижающие надежность изделий. К ним относятся:

- а) неблагоприятные сочетания размеров и технических характеристик деталей в одном узле изделия;
- б) неблагоприятные комбинации эксплуатационных условий для серийных изделий, отсутствовавшие при стендовых и летных испытаниях опытных изделий;
- в) неотлаженность и нестабильность новых технологий производственных процессов, низкая квалификация некоторых исполнителей, особенно в начальный период выпуска изделий.

Особенности производства и эксплуатации серийных изделий отражаются также и на работах, выполняемых с целью определения и ликвидации причин отказов изделий. Появляются факторы, существенно усложняющие исследования дефектов и внедрение мероприятий с целью их устранения. К таким факторам относятся, в первую очередь, большое количество ранее выпущенных и эксплуатируемых изделий, на каждом из которых по-

тенциально возможен исследуемый дефект, и вследствие этого определяются сжатые сроки исследования дефектов, разработки, проверки и внедрения мероприятий.

Следует отметить, что вследствие высокого уровня опытно-конструкторской отработки отказы элементов изделий авиационной техники в настоящее время являются относительно редкими. Это не снижает их опасности, но значительно затрудняет поиск действительных причин дефектов.

Практика показывает, что дефекты авиационных изделий целесообразно разделить на две группы по следующим признакам.

1. Уровень исследований, проводимых с целью определения причины дефекта.

По этому признаку дефекты следует разделить на сложные и простые.

Сложным дефектом предлагается называть такой, основная причина которого общепринятыми (стандартными) методами исследования не определяется, и требуются дополнительные специальные исследования на лабораторных и испытательных стендах и (или) летательных аппаратах для установления повышенных нагрузок в особых условиях эксплуатации.

Под основной причиной дефекта понимается главный фактор, действие которого значительно снижает запас работоспособности детали или узла, он определяет, по существу, появление отказа. Отрицательное же воздействие других причин, вскрытых при исследовании, лишь способствует образованию дефекта.

В случае, если основная причина дефекта найдена общепринятыми методами исследования, его следует классифицировать как простой.

2. Разделение причин дефектов по функциональным группам специалистов, ответственных за их появление. По этому признаку дефекты разделяются на конструктивные, производственные и эксплуатационные.

Конструктивный — обусловлен ошибками конструктора, несовершенством примененных методов конструирования, инженерных расчетов, методов определения запасов работоспособности специальными испытаниями.

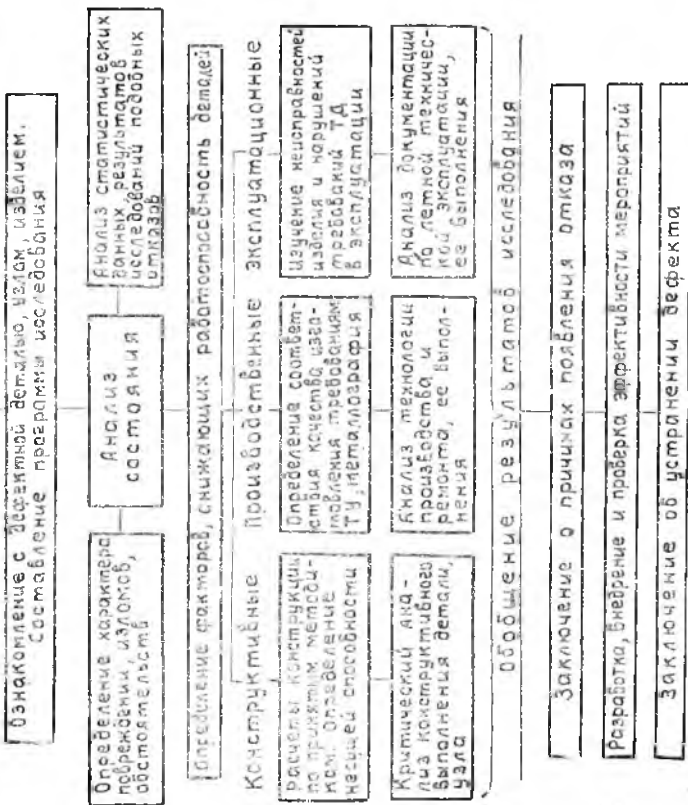
Производственный (ремонтный) — обусловлен несоответствием материала заданным требованиям, низким качеством изготовления (ремонта), нарушением технологического процесса или его несовершенством.

Эксплуатационный — обусловлен нарушением установленных правил эксплуатации или технического обслуживания.

Схема методики исследования причин отказов представлена на рис. 5.5. Методика разработана применительно к дефектам прочностного характера, однако она пригодна для проведения

## Объект исследования

### I этап. Традиционные методы:



### II этап. Дополнительные исследования

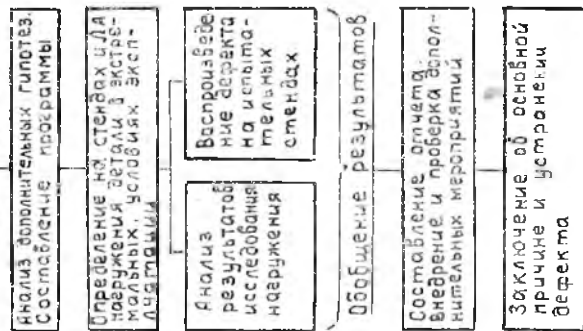


Рис. 5.5. Схема методики исследования причин отказов изделий авиационной техники

исследований практически при любых отказах изделий авиационной техники.

На I этапе исследования причин отказа изделий используются общепринятые, традиционные методы исследований. Фотографируются поврежденные или разрушенные детали и узлы, описывается их состояние: характер износа и повреждения поверхностей, виды изломов (статический, усталостный, повторно статический), различные отложения, следы. Составляется программа исследования на первом этапе.

В процессе анализа внешнего состояния и определения факторов, снижающих работоспособность деталей, изучаются особенности эксплуатации изделия, на котором проявился дефект (по записям в формуляре изделия о наработке, режимах эксплуатации, регулировках и заменах агрегатов, по расшифровке записей на МСРП, рекламационному акту, карточкам учета неисправностей). Особенности изготовления (ремонта) дефектной детали и изделия в целом изучаются по документам хранящегося на предприятии «Дела изделия» — паспортам на изготовление и сборку, протоколам испытаний. На этой стадии исследования выполняется расчет параметров надежности, в котором приводятся статистические сведения об аналогичных дефектах, проявившихся ранее.

Исследуемые детали проверяются на соответствие требованиям технической документации. Изучается конструкторская и технологическая документация на изготовление, испытания и эксплуатацию (наличие изменений документации в процессе выпуска изделий, проверка размерных цепей в исследуемом узле; анализ методов и результатов расчетов на статическую и динамическую прочность, результатов экспериментального определения силовой и тепловой напряженности, особенностей эксплуатации дефектной детали; выявление недостатков технической документации в связи с исследуемым дефектом). Проводятся подробные металлографические исследования (характер излома, микро- и макроструктура, химический состав, механические свойства материала, остаточные напряжения в детали, исследования ее на перегрев, другие параметры, предусмотренные программой).

Обобщение результатов этих работ позволяет в случае простого дефекта составить заключение о его причинах и разработать мероприятия, исключающие эти причины.

Исследования II этапа проводятся при изучении сложного дефекта, причины появления которого общепринятыми методами четко не определены и необходимо использование всего комплекса исследований, включая исследования нагружения в экстремальных условиях эксплуатации, которые выполняются на специальных стендах, а в ряде случаев — на летательных аппаратах.

В этом случае проводятся также дополнительные расчеты и экспериментальные исследования статической и динамической прочности по новым уточненным методикам. Эти исследования являются специфическими для данного изделия и конкретных условий его эксплуатации.

Программа исследования II этапа составляется на основании материалов исследований I этапа с учетом результатов анализа новых гипотез о причинах проявления дефекта. Гипотезы строятся с учетом истории доводки изделия в конструкторском бюро, изучения опыта производства и эксплуатации подобных изделий, выпускаемых другими предприятиями, материалов отраслевых институтов.

Эффективность исследований на этом этапе значительно повышается тогда, когда удается воспроизвести изучаемый дефект вне летательного аппарата, на специальных испытательных стендах. Это оборудование используется также для ускоренного определения эффективности ранее внедренных и вновь вводимых мероприятий.

Результаты комплексных исследований позволяют определить основную причину дефекта и факторы, способствующие ее проявлению, разработать и внедрить мероприятия, полностью устраняющие дефект. Эти мероприятия являются, как правило, комплексными. Они включают вопросы совершенствования конструкции, технологии производства, методов эксплуатации и внедряются группами по мере проверки их эффективности. В первую очередь реализуются рекомендации, не требующие такой проверки, например, новые контрольные операции или ограничения режимов работы изделия в эксплуатации. Затем обрабатываются и внедряются более значительные мероприятия.

Интенсивное совершенствование авиационной техники возможно только при организации совместной активной работы конструкторско-технологических, производственных и эксплуатационных коллективов специалистов, создания между ними постоянной деловой связи.

## **6. АНАЛИЗ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ**

Постоянное совершенствование тактико-технических характеристик авиационной техники (рост скоростей полета самолетов, их полетной массы, пассажироемкости, снижение расхода топлива, шума, вредных выделений и др.) и одновременное повышение требований по обеспечению безопасности и регулярности полетов приводят к значительному усложнению организа-



ции технической эксплуатации летательных аппаратов, к усложнению управления ею.

В этих условиях кардинальным решением проблем явилось бы создание автоматизированных систем управления работой инженерно-авиационных служб (ИАС) гражданской авиации (ГА). И такие системы в настоящее время создаются. К ним относятся автоматизированные системы «Аэрофлот», «Безопасность», «Поиск». Для решения указанных задач вычислительные центры управлений ГА, крупные авиапредприятия оснащаются ЭВМ.

Одной из важнейших задач ИАС является оперативная оценка надежности авиационной техники на основании информации об отказах и неисправностях авиационной техники в период ее эксплуатации.

Подобная информация собирается в эксплуатирующих предприятиях путем заполнения карточек учета неисправностей авиатехники (приложение 1).

Каждые отказ, неисправность, выявленные экипажем в полете или ИАС при техническом обслуживании, тщательно анализируются для определения причин, места, условий их возникновения, последствий.

Результаты анализа заносятся в карточку, которая затем отправляется в единый центр, где собранная таким образом информация по каждому конкретному типу авиационной техники подвергается статистической обработке с целью определения необходимых характеристик надежности авиационной техники.

В зависимости от поставленных задач такая обработка данных об отказах и неисправностях может производиться на разных уровнях — авиапредприятия, управления или отрасли в целом.

Наиболее полную информацию о характеристиках физической надежности узлов и агрегатов авиационной техники дает установление законов распределений их отказов<sup>1</sup> с помощью методов математической статистики.

При этом следует учитывать специфику эксплуатации авиационной техники, благодаря которой не удается в течение достаточно большого промежутка времени собрать сведения об ее отказах, так как в эксплуатацию постоянно поступают новые модификации, а характеристики последних отличаются от таковых предыдущих выпусков. Поэтому для решения каких-то конкретных технических задач из сотен изделий, находящихся в эксплуатации, удается привлечь лишь десятки.

Кроме того, расчет характеристик надежности в значительной степени определяется тем, каким образом собирается инфор-

<sup>1</sup> Здесь и далее имеются в виду и неисправности.

мация об отказах, как построен план наблюдений, к какому классу, с позиций теории надежности, отнесено изделие — восстанавливаемому или невосстанавливаемому.

Поэтому решения, полученные в результате анализа и расчета характеристик надежности, принимаются с определенным уровнем значимости  $\alpha$  или риском ошибки  $(1-\alpha)$ .

### **6.1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ СИСТЕМЫ СБОРА И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ О НАДЕЖНОСТИ АТ. ПЛАНЫ НАБЛЮДЕНИИ**

Система сбора и обработки информации о надежности на уровне отрасли должна обеспечивать [18]:

получение сопоставимых и объективных данных о надежности однотипных изделий;

возможность обобщения в отраслях результатов обработки этой информации;

возможность организации централизованной обработки информации о надежности узлов и агрегатов, входящих в различные по функциональному назначению системы;

установление эффективной обратной связи между разрабатывающими, изготавливающими и эксплуатирующими организациями изделий авиационной техники.

Выполнение этих требований позволяет решать такие задачи, как определение причин возникновения отказов и неисправностей авиационной техники: выявление деталей, узлов, систем, которые лимитируют ресурс изделия в целом; определение влияния условий и режимов эксплуатации на надежность; установление и корректирование нормирующих показателей надежности как по изделию в целом, так и по его составным частям; определение сроков профилактических осмотров и работ; оптимизацию расхода запасных частей и систем планово-предупредительных ремонтов; определение экономической эффективности от внедрения мероприятий по повышению надежности авиационной техники.

На основе решения указанных задач в целях повышения надежности проектные организации разрабатывают конструктивные усовершенствования, предприятия-изготовители совершенствуют технологию изготовления, сборки и испытаний, а эксплуатирующие предприятия разрабатывают организационно-технические мероприятия, направленные на повышение качества технического обслуживания и ремонта авиационной техники.

Как в авиационной промышленности (изготовитель), так и в гражданской авиации (потребитель) по каждому конкретному типу авиационной техники имеются так называемые головные

предприятия (в них — службы надежности), которые производят сбор и обработку информации о надежности. Организацию этих работ осуществляют предприятия-изготовители. Окончательная обработка результатов производится или на предприятиях, или в отраслевых НИИ.

Головные предприятия составляют технические задания на сбор и обработку информации о надежности конкретного типа авиационной техники, где ставится целевая задача, определяются территориальное размещение объектов исследования, число предприятий, где будут проводиться такие работы.

Разрабатываются планы наблюдений и программы обработки информации о надежности с учетом имеющихся ЭВМ, необходимые формы документации и инструкции по их заполнению.

Руководство такими работами осуществляют, как правило, главные инженеры головных предприятий.

Результаты исследований доводятся до сведения всех заинтересованных организаций и предприятий.

Одним из важнейших этапов организации работ по сбору информации о надежности АТ является планирование наблюдений, которое включает в себя [19]:

номенклатуру изделий АТ;

номенклатуру показателей надежности, подлежащих оценке по результатам этих наблюдений;

доверительную вероятность, с которой должны находиться доверительные границы для показателей надежности;

критерии отказов или предельных состояний;

условия и режимы эксплуатации АТ;

планы наблюдений.

С позиции теории надежности план наблюдений определяет вид выборки (полная, усеченная, смешанная) и, следовательно, методику расчета характеристик надежности.

Различают следующие основные планы проведения наблюдений:

$[N, U, N]$ ;  $[N, U, T]$ ;  $[N, U, r]$ ;  $[N, R, T]$  и  $[N, R, r]$ ,

где  $N$  — общее число изделий, поставленных под наблюдения;

$U$  — планы для неремонтируемых изделий (отказавшие изделия АТ в дальнейшем могут ремонтироваться, но их отказы после ремонта исключаются из рассмотрения);

$T$  — установленное время наблюдения;

$R$  — планы для ремонтируемых изделий (результаты наблюдения за отремонтированными изделиями включаются в общие вплоть до замены изделия);

$r$  — число отказов (предельных состояний), до возникновения которых проводятся наблюдения.

Эти планы трактуются следующим образом:

$[N, U, N]$  — под наблюдение поставлено  $N$  изделий авиационной техники, наблюдение ведется до отказа (наступления предельного состояния) всех изделий, отказавшие изделия новыми не заменяются (случай полной выборки, рис. 6.1);

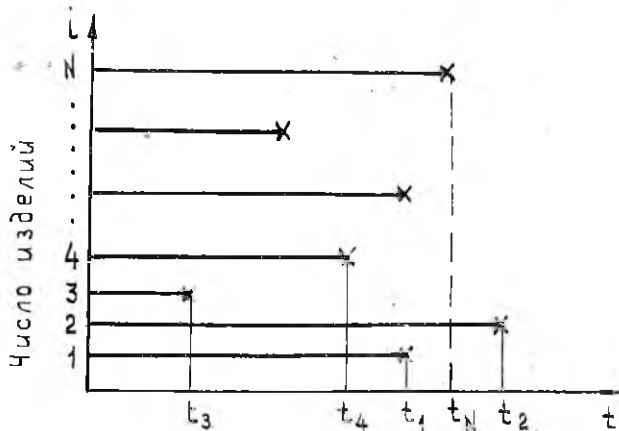


Рис. 6.1. Схема плана наблюдений  $[N, U, N]$ :  $\times$  — время наступления отказа

$[N, U, T]$  — под наблюдение поставлено  $N$  изделий, наблюдение ведется до наступления момента  $T$ , отказавшие изделия новыми не заменяются (усеченная выборка, рис. 6.2);

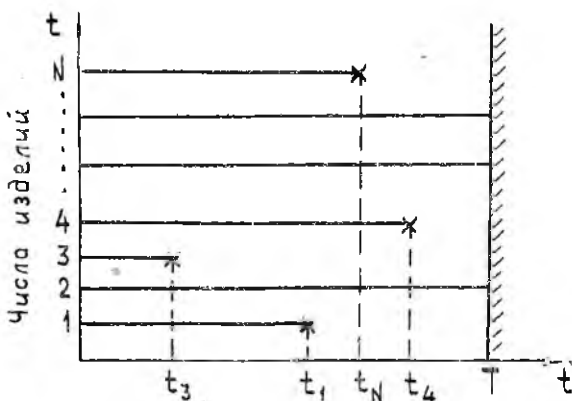


Рис. 6.2. Схема плана наблюдений  $[N, U, T]$

$[N, U, r]$  — под наблюдение поставлено  $N$  изделий, наблюдения ведутся до появления  $r$  отказов, отказавшие изделия новыми не заменяются (усеченная выборка, рис. 6.3);

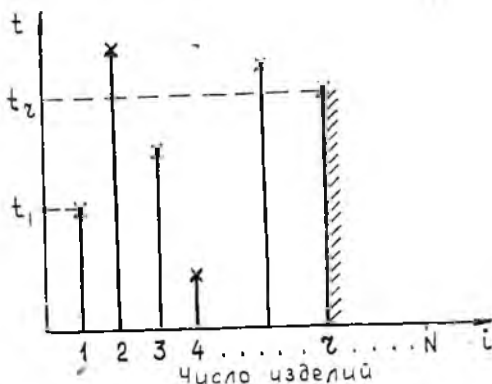


Рис. 6.3. Схема плана наблюдений  $[N, U, r]$

$[N, R, T]$  — под наблюдение поставлено  $N$  изделий, наблюдения ведутся до наступления момента  $T$ , отказавшие изделия заменяются новыми или ремонтируются (усеченная выборка, рис. 6.4);

$[N, R, r]$  — под наблюдение поставлено  $N$  изделий, наблюдения ведутся до наступления  $r$  отказов, отказавшие изделия заменяются новыми или ремонтируются (усеченная выборка, рис. 6.5).

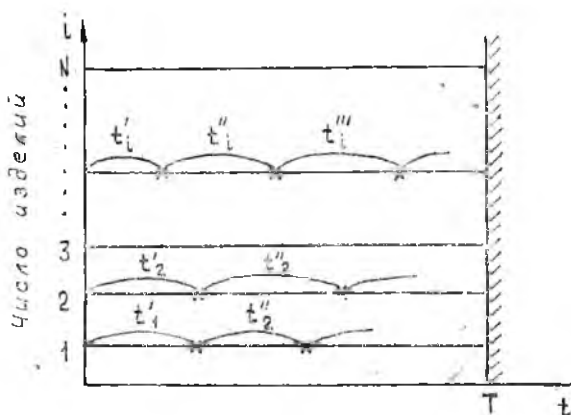


Рис. 6.4. Схема плана наблюдений  $[N, R, T]$

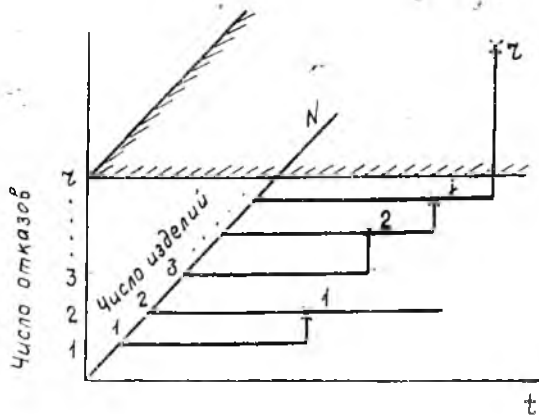


Рис. 6.5. Схема плана наблюдений  $[N, R, r]$

План наблюдений  $[NUN]$  в практике обычной эксплуатации авиационной техники встречается редко, требует длительного времени наблюдения. Как правило, он используется для определения характеристик надежности деталей, узлов, изделий в целом при проведении специальных испытаний в стендовых или эксплуатационных условиях.

Например, для определения усталостной долговечности лопаток турбомашин в определенных стендовых условиях необходимо отобрать представительную партию их (выборку  $N$ ) и все довести до разрушения по какому-либо признаку.

Или, если требуется определить наработку до отказа двигателей какого-либо типа с учетом влияния климатической зоны страны, необходимо провести наблюдения за всеми двигателями ( $N$ ), работающими в условиях данной зоны, до наступления отказа по заданным признакам.

Остальные планы наблюдений достаточно легко осуществимы в условиях как обычной эксплуатации, так и при различных видах испытаний авиационной техники. Выбор того или иного плана определяется характером задач, решаемых в каждом конкретном случае.

## 6.2. РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК НАДЕЖНОСТИ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

При определении характеристик надежности, как правило, действительные закономерности, их описывающие, неизвестны. Установление таких закономерностей производится при обработке статистических данных, собранных по тому или иному пла-

ну наблюдений, путем построения экспериментальных зависимостей  $P^*(t)$ ,  $f_i^*(t)$ ,  $\lambda_i^*(t)$ ,  $\omega^*(t)$ .

Для этого имеющаяся наработка до отказа располагается в ряд в порядке возрастания (строится вариационный ряд), который разбивается на  $K$  интервалов (разрядов)  $\Delta t_1, \Delta t_2, \dots, \Delta t_i, \dots, \Delta t_k$ . Если какие-либо участки наработки не вызывают особого интереса, величины интервалов принимаются равными между собой и такими, чтобы в каждый из них попадало по несколько отказов. Четких правил разбиения наработки на интервалы не выработано. Возможно использование правила Старджена, согласно которому число интервалов  $K = 1 + 3,3 \lg n$ , где  $n$  — общее число отказов.

В каждом интервале подсчитывается число отказов  $\Delta n_i$  и рассчитываются необходимые характеристики по формулам (см. разд. 1):

плотность вероятностей отказов

$$f_i^*(t) = \frac{\Delta n_i}{N \Delta t_i};$$

интенсивность отказов

$$\lambda_i^*(t) = \frac{\Delta n_i}{(N - n_{i-1}) \Delta t_i};$$

вероятность безотказной работы

$$P_i^*(t) = 1 - \frac{\sum \Delta n_i}{N} \quad \text{или} \quad \frac{f_i^*(t)}{\lambda_i^*(t)};$$

параметр потока отказов для ремонтируемых изделий

$$\omega^*(t) = \frac{\Delta n_i}{N \Delta t_i}.$$

Результаты расчета обычно сводятся в таблицу (табл. 6.1).

Таблица 6.1

Типовая таблица для расчета эмпирических характеристик надежности

Номер интервала (разряда)	$t_i, t_{i+1}$	$\Delta t_i$	$\Delta n_i$	$f_i^*(t)$	$\lambda_i^*(t)$	$P_i^*(t)$
1	$t_1, t_2$	$\Delta t_1$	$\Delta n_1$	$f_1^*$	$\lambda_1^*$	$P_1^*$
2	$t_2, t_3$	$\Delta t_2$	$\Delta n_2$	$f_2^*$	$\lambda_2^*$	$P_2^*$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
$i$	$t_i, t_{i+1}$	$\Delta t_i$	$\Delta n_i$	$f_i^*$	$\lambda_i^*$	$P_i^*$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
$K$	$t_k, t_{k+1}$	$\Delta t_k$	$\Delta n_k$	$f_k^*$	$\lambda_k^*$	$P_k^*$

По данным таблицы 6.1 строятся гистограммы — геометрическая интерпретация таблицы (рис. 6.6).

На основе анализа вида гистограмм при сравнении их с известными функциями распределений (приложение 2) и физической природы проявления отказа, структуры изделия, условий и режима эксплуатации принимается гипотеза о виде теоретического распределения отказов [7, 16, 20, 21].

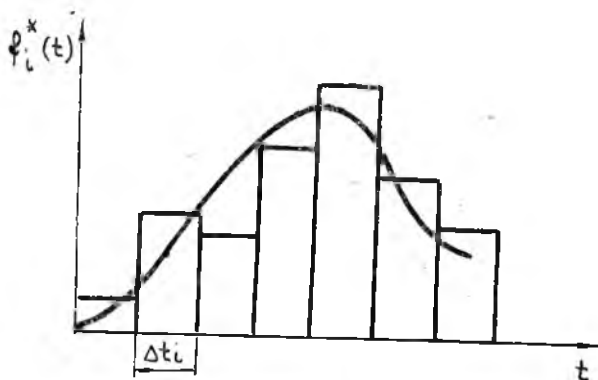


Рис. 6.6. Гистограмма и ее огибающая

Так, отличительной особенностью *экспоненциального распределения* является то, что интенсивность отказов здесь не зависит от наработки. Причины таких отказов — внезапные концентрации нагрузок, действующих внутри или вне объекта. Отказ наступает тогда, когда нагрузка превысит допустимую величину. Понятно, что наработка в этом случае с интенсивностью отказов никак не связана. Такое распределение характерно для большого класса внезапных отказов, которые появляются без каких-либо предшествующих симптомов.

Другим примером проявления действия экспоненциального распределения может быть распределение отказов объекта, состоящего из большого числа элементов, вероятности отказов которых малы. Обычно это отказы радиоэлектронного, высотного оборудования самолетов и др.

*Нормальное распределение* имеет место, когда суммируется достаточно большое число независимых или слабо зависимых случайных величин. При этом накладывается ограничение, состоящее в том, что все величины в общей сумме должны играть относительно малую роль.

В противном случае резко превалирующая в этой сумме величина и определяет закон ее распределения. При неограничен-



ном росте числа испытаний другие распределения приближаются к нормальному.

В практике эксплуатации авиационной техники нормальное распределение характерно для износных отказов с постоянной скоростью износа. К этой группе относятся собственно износы, старение материалов, накопление повреждений в материале конструкций и другие процессы с постоянной или примерно постоянной скоростью развития.

Примером распределения может служить износ протекторов авиашин, усталостная долговечность многих узлов и деталей АТ, старение материалов уплотнений.

Физической моделью *логарифмически-нормального распределения* может быть следующая ситуация. Каждое воздействие внешней нагрузки приводит к накоплению повреждений в материале детали. При этом величина добавляемого повреждения пропорциональна накопленному. Отказ наступает тогда, когда накопленное повреждение превысит определенную величину. Примером может служить усталостная долговечность лопаток, дисков, валов и других деталей авиадвигателей, силовой набор, узлы крепления агрегатов и другие детали планера ЛА.

*Распределению Вейбулла* обычно отвечает физическая модель так называемого «слабого звена». Объект представляется состоящим из большого числа элементов, подверженных повреждениям или поломкам (сплошные материалы можно представить состоящими из большого числа зерен). Накопление повреждений в элементах идет независимо друг от друга. Отказ объекта наступает при первом отказе какого-либо из элементов. При этом независимо от вида распределения отказов каждого элемента распределение отказов объекта в целом будет вейбулловским.

Распределение Вейбулла, как и логарифмически-нормальное распределение, хорошо описывает усталостную долговечность авиационных конструкций, а также приработочные отказы.

*Распределение Рэлея* характерно для объектов, имеющих интенсивные износы, старение, накопление повреждений.

*Равномерное распределение* применяется, если отсутствуют физические предпосылки, приводящие к рассмотренным выше моделям, а гистограмма плотности не имеет явно выраженной тенденции к ее увеличению или уменьшению.

Рассмотренные функции распределения не являются исчерпывающими. При обработке статистических данных могут быть получены и другие виды распределений.

В некоторых случаях гистограммы могут указывать на сочетание двух или более распределений, что свидетельствует о действии на разных этапах наработки объекта различных физических причин появления отказов.

### 6.2.1. Определение неизвестных параметров распределений

Каждый вид распределения имеет определенное число параметров [7, 19, 20]. После принятия гипотезы о том или ином виде распределения необходимо по статистическим данным произвести оценку этих параметров с заданной доверительной вероятностью. Эта оценка производится с помощью составления и решения некоторой системы уравнений.

Существует несколько методов составления уравнений.

Так, для полной выборки может быть использован метод моментов [5, 9, 22]. Согласно этому методу неизвестные параметры рассчитываются таким образом, чтобы некоторые важнейшие числовые характеристики (моменты) теоретического распределения были равны соответствующим статистическим характеристикам. Например, если поведение функции  $f(t)$  зависит от значений двух параметров  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ , то они подбираются таким образом, чтобы математическое ожидание  $m_t$  и дисперсия  $D_t$  теоретического распределения совпадали с соответствующими статистическими характеристиками  $m_t^*$  и  $D_t^*$ .

Так, для нормального распределения значения параметров будут:

$$m_t = m_t^* = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i;$$

$$\sigma_t^2 = D_t^* = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i^2 - (m_t^*)^2.$$

Если поведение кривой зависит от трех параметров, то их можно подобрать так, чтобы совпали первые три момента и т. д.

Для усеченных выборок при расчете неизвестных параметров используются методы максимума правдоподобия и разделяющих разбиений. Эти методы могут быть использованы и для полной выборки.

Метод максимума правдоподобия основан на идее определения вероятности наблюдаемых событий и нахождении таких значений параметров, которые обращают эту вероятность в максимум.

Рассмотрим использование этого метода для плана наблюдений  $[N, U, T]$  перемонтируемых объектов.

Здесь из всей совокупности наблюдаемых объектов  $N$  имеется реализация случайной величины (наработки до отказа)  $t_i: t_1, t_2, \dots, t_i, \dots, t_n < T$ , где  $n$  — число отказов за время наблюдений  $T$ .

Поскольку время есть непрерывная случайная величина, вероятность попадания в точку  $P(t = t_i) = 0$ . Поэтому следует

рассматривать вероятность попадания случайной величины  $t_i$  в некоторый интервал времени  $t_i \pm \frac{\Delta t_i}{2}$ .

Вероятность попадания в этот интервал

$$P \left\{ t_i - \frac{\Delta t_i}{2} \leq t \leq t_i + \frac{\Delta t_i}{2} \right\} = f(t_i) \Delta t_i.$$

Вероятность же получения совокупности значений  $t_i$

$$P_1 = f(t_1) f(t_2) \dots f(t_n) \Delta t_1 \Delta t_2 \dots \Delta t_i \dots \Delta t_n.$$

При равных интервалах  $P_1 = f(t_1) f(t_2) \dots f(t_i) \dots f(t_n) \Delta t^n =$   
 $= \Delta t^n \prod_{i=1}^n f(t_i).$

Вероятность превышения наработки до отказа времени наблюдений  $t_j > T$ , где  $j \in [n+1, n+2, \dots, N]$ , будет равна  $P(t_j > T) = 1 - F(T)$ , где  $F(T)$  — функция распределения случайной величины  $T$ . Для совокупности значений  $P_2 = [1 - F(T)]^{N-n}$ .

Полное уравнение вероятности получения всей совокупности значений величины  $t$  будет иметь вид

$$P = P_1 P_2 = \Delta t^n \prod_{i=1}^n f(t_i) [1 - F(T)]^{N-n}.$$

Эта вероятность, согласно методу, должна быть максимальной.

Действительно, данная совокупность значений случайной величины  $t$  уже реализована, поскольку статистика отказов получена по данным реальной эксплуатации объекта.

Поделим величину  $P$  на  $\Delta t^n$ , так как  $\Delta t$  вносит в совокупность некоторую неопределенность. При этом остается максимальной и величина

$$\frac{P}{\Delta t^n} = \prod_{i=1}^n f(t_i) [1 - F(T)]^{N-n}.$$

Для удобства расчета берется логарифм от этого выражения:

$$L = \ln \frac{P}{\Delta t^n} = \sum_{i=1}^n \ln f(t_i) + (N-n) \ln [1 - F(T)]. \quad (6.1)$$

Функцию  $L$  и называют функцией правдоподобия.

Для определения неизвестных параметров распределения  $(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m)$ , соответствующих максимальной вероятности, следует взять частные производные от функции  $L$  по этим параметрам, приравнять их к нулю и решить систему уравнений (исследование функции на экстремумы):

$$\frac{\partial L}{\partial \alpha_1} = 0; \quad \frac{\partial L}{\partial \alpha_2} = 0, \quad \dots, \quad \frac{\partial L}{\partial \alpha_m} = 0.$$

Так, для экспоненциального распределения случайной величины имеем:  $f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$ ,  $1 - F(T) = P(T) = e^{-\lambda T}$ .

Производная по неизвестному параметру  $\lambda$  от функции правдоподобия будет иметь вид

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial}{\partial \lambda} \ln(\lambda e^{-\lambda t_i}) + (N-n) \frac{\partial}{\partial \lambda} \ln e^{-\lambda T} = 0.$$

Решая это уравнение, получим

$$\frac{\partial}{\partial \lambda} \ln(\lambda e^{-\lambda t}) = \frac{1}{\lambda} - t; \quad \frac{\partial}{\partial \lambda} \ln e^{-\lambda T} = -T.$$

Отсюда

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda} = \frac{n}{\lambda} - \sum_{i=1}^n t_i - (N-n) T = 0$$

и

$$\frac{1}{\lambda} = T_{\text{ср}} = \frac{1}{n} \left[ \sum_{i=1}^n t_i + (N-n) T \right].$$

Для нормального распределения по усеченным данным без вывода уравнения имеют вид:

$$(N-n) \frac{\varphi\left(\frac{T-m_t}{\sigma_t}\right)}{1 - \Phi\left(\frac{T-m_t}{\sigma_t}\right)} + \frac{1}{\sigma_t^2} \sum_{i=1}^n t_i - \frac{n}{\sigma_t^2} m_t = 0; \quad (6.2)$$

$$(N-n) \frac{\varphi\left(\frac{T-m_t}{\sigma_t}\right)}{1 - \Phi\left(\frac{T-m_t}{\sigma_t}\right)} T - n + \frac{1}{\sigma_t^2} \sum_{i=1}^n t_i^2 - \frac{m_t}{\sigma_t^2} \sum_{i=1}^n t_i = 0,$$

где  $\Phi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t e^{-u^2/2} du$  — стандартная нормальная функция распределения;

$$\varphi\left(\frac{T-m_t}{\sigma_t}\right) = f(T).$$

Уравнения (6.2) могут быть решены только численным методом с использованием ЭВМ.

Для распределения Вейбулла можно получить уравнения, выраженные в явном виде:

$$t_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i^m + \frac{N-n}{n} T^m;$$

$$t_0 = \frac{\sum_{i=1}^n t_i^m \ln t_i + (N-n) T^m \ln T}{\frac{n}{m} + \sum_{i=1}^n \ln t_i}, \quad (6.3)$$

где  $t_0$  и  $m$  — неизвестные параметры.

Систему (6.3) можно решить графическим способом либо с помощью ЭВМ.

Графический способ предусматривает построение кривых  $t_0 = \varphi_1(m)$  и  $t_0 = \varphi_2(m)$  по ряду значений  $m$ . Точка пересечения этих кривых даст значение искомых параметров  $t_0$  и  $m$  (рис. 6.7).

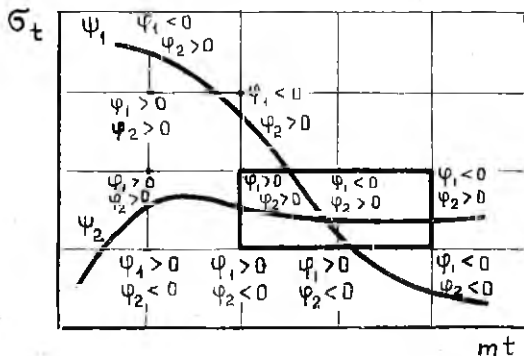


Рис. 6.7. Схема поиска корней уравнения

Метод максимума правдоподобия наилучший из известных методов определения неизвестных параметров распределений. Если неизвестный параметр имеет эффективную оценку, то этот метод позволяет получить такую оценку. Практически метод максимума правдоподобия во всех случаях при больших объемах выборки дает более эффективные оценки, чем другие методы, но реализовать его часто бывает сложно. В таких случаях следует применять метод разделяющих разбиений.

Метод разделяющих разбиений заключается в приравнивании эмпирических значений функции распределения  $F^*(t)$  при некоторых выбранных значениях  $t_i$  к значениям теоретической функции распределения  $F(t)$ . При этом составляется и решается система уравнений по числу неизвестных параметров.

Так, для двух неизвестных параметров система имеет вид

$$F^*(t_1) = F(\alpha_1, \alpha_2, t_1); \quad F^*(t_2) = F(\alpha_1, \alpha_2, t_2).$$

В данном случае  $t_1$  и  $t_2$  следует выбирать в первой и последней третях диапазона значений  $t_i$ .

Для нормального распределения неизвестные параметры определяются из уравнений:

$$F^*(t_1) = \Phi\left(\frac{t_1 - m_t}{\sigma_t}\right);$$

$$F^*(t_2) = \Phi\left(\frac{t_2 - m_t}{\sigma_t}\right).$$

По эмпирическим значениям функций  $F^*(t_1)$  и  $F^*(t_2)$  из таблицы значений  $\Phi(z)$  [5,9] определяются аргументы  $z_1$  и  $z_2$ . Тогда

$$z_1 = \frac{t_1 - m_t}{\sigma_t}; \quad z_2 = \frac{t_2 - m_t}{\sigma_t}.$$

Решение уравнений дает

$$m_t = \frac{t_1 z_2 - t_2 z_1}{z_2 - z_1}, \quad \sigma_t = \frac{t_2 - t_1}{z_2 - z_1}. \quad (6.4)$$

Случай логарифмически-нормального распределения сводится к предыдущему, так как нормальное распределение здесь имеют логарифмы случайных величин. Параметры данного распределения вычисляются по формулам:

$$m_e = \frac{\ln t_1 z_2 - \ln t_2 z_1}{z_2 - z_1}; \quad \sigma_e = \frac{\ln t_2 - \ln t_1}{z_2 - z_1}, \quad (6.5)$$

где  $m_e$  и  $\sigma_e$  — параметры логарифмически-нормального распределения.

Тогда

$$m_t = \exp[m_e + 0,5 \sigma_e^2];$$

$$\sigma_t^2 = [\exp(\sigma_e^2) - 1] \exp(2m_e + \sigma_e^2). \quad (6.6)$$

Виды зависимостей для определения неизвестных параметров распределений для ряда планов наблюдений, установленные с помощью метода максимума правдоподобия, приведены в [23].

### 6.2.2. Проверка правильности принятой гипотезы

При обработке данных об отказах объектов авиационной техники всегда возникают два вопроса методического плана. Первый — насколько сама выборка статистически однородна и второй — насколько она представительна (т. е. насколько точно отражает свойства генеральной совокупности).

Вопрос об однородности выборки, как уже упоминалось ранее, возникает в связи с тем, что информация об отказах собирается для однотипных объектов авиационной техники, но вышущенных разными предприятиями, или одним предприятием, но в разное время, с введением каких-либо изменений в конструк-

ции, эксплуатирующихся в разных условиях. Поэтому необходима оценка возможности совместной обработки такой статистики, т. е. установление возможности пренебрежения различиями в надежности таких групп, считая их случайными, или необходимости разделения на самостоятельные группы.

Вопрос о представительности выборки сводится к выяснению правильности принятой гипотезы о виде теоретического распределения и определению, насколько точно характеристики, найденные по статистическим данным, отражают свойства генеральной совокупности.

Для решения указанных вопросов широко используется критерий согласия  $\chi^2$  (критерий «хи-квадрат» Пирсона).

В общем виде критерий имеет вид

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^K \frac{(m_i - M_i)^2}{M_i}, \quad (6.7)$$

где  $K$  — число групп или разрядов (интервалов, на которые разбиты статистические данные;

$m_i$  — число наблюдений изучаемого события, попавших в  $i$ -ю группу (например, число отказов);

$M_i$  — математическое ожидание числа событий в  $i$ -й группе при принятой гипотезе.

Распределение величины (6.7), как показывается в математической статистике, при достаточно большом  $n$  приближается к распределению «хи-квадрат» с числом степени свободы  $r = K - S$ , где  $S$  — число независимых условий («связей»), для которого составлены специальные таблицы [5, 7, 9].

Процедура использования критерия  $\chi^2$  обычно такова. По формуле (6.7) оценивается мера расхождения между статистическими данными и оценкой их теоретического значения, и по таблице для  $r$  числа степеней свободы находится вероятность того, что табличная величина превысит расчетную. Если эта вероятность ( $\gamma$ ) мала (менее 0,1), проверяемая гипотеза отвергается.

Задача о проверке однородности статистических данных сводится к следующему. Пусть имеется две группы однотипных объектов авиационной техники, изготовленных на одном предприятии, но в разное время, с некоторым изменением конструкции. Пусть также  $n_1$  и  $n_2$  — наблюдаемое число отказов первой и второй группы,  $t_{\Sigma 1}$  и  $t_{\Sigma 2}$  — соответственно их суммарные наработки,  $M_1 = t_{\Sigma 1}/T_1$  и  $M_2 = t_{\Sigma 2}/T_2$  — математические ожидания числа отказов в каждой из групп за время их наработки  $t_{\Sigma 1}$  и  $t_{\Sigma 2}$ , где  $T_1$  и  $T_2$  — математические ожидания наработки до отказа в группах,

Оценка сходимости теоретического и статистического распределений

Номер интервалов	$t_i, t_{i+1}$	$\Delta t_i$	$\Delta n_i$	$Q_i(t) = \int_{t_i}^{t_{i+1}} f(t) dt$	$NQ_i(t)$	$\Delta n_i - NQ_i(t)$	$U_i^2 = \frac{[\Delta n_i - NQ_i(t)]^2}{NQ_i(t)}$
1	$t_1, t_2$	$\Delta t_1$	$\Delta n_1$	$Q_1$	$NQ_1$	$\Delta n_1 - NQ_1$	$U_1^2$
2	$t_2, t_3$	$\Delta t_2$	$\Delta n_2$	$Q_2$	$NQ_2$	$\Delta n_2 - NQ_2$	$U_2^2$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$i$	$t_i, t_{i+1}$	$\Delta t_i$	$\Delta n_i$	$Q_i$	$NQ_i$	$\Delta n_i - NQ_i$	$U_i^2$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$K$	$t_k, t_{k+1} = T$	$\Delta t_k$	$\Delta n_k$	$Q_k$	$NQ_k$	$\Delta n_k - NQ_k$	$U_k^2$
$K+1$	$t_{k+1}, t_{k+2}$	$\Delta t_{k+1}$ ( $\geq \Delta t_k$ )	$\Delta n_{k+1} = N - n$	$1 - \sum_{i=1}^k Q_i$	$N(1 - \sum_{i=1}^k Q_i)$	$N - n - N(1 - \sum_{i=1}^k Q_i)$	$\chi^2 = \sum_{i=1}^{K+1} U_i^2$



Пусть для параметра  $m$  получена несмещенная оценка  $m^*$ . Определим возможную при этом ошибку. Назначим некоторую достаточно большую вероятность  $\beta$  ( $\beta = 0,9; 0,95; 0,99$ ) и найдем такое значение  $\varepsilon$ , для которого

$$P |m^* - m| < \varepsilon = \beta. \quad (6.11)$$

Тогда диапазон практически возможных ошибок при использовании  $m^*$  вместо  $m$  будет равен  $\pm \varepsilon$ . Ошибки большие этого значения возможны с малой вероятностью  $\alpha = 1 - \beta$ .

Равенство (6.11) можно представить в виде

$$P (m^* - \varepsilon < m < m^* + \varepsilon) = \beta.$$

Это равенство означает, что с вероятностью  $\beta$  интервал  $I_\beta = (m^* - \varepsilon; m^* + \varepsilon)$  накроет истинное значение  $m$ . Вероятность  $\beta$  есть доверительная вероятность, а интервал  $I_\beta$  — доверительный интервал. При этом  $m_1 = m^* - \varepsilon$  является нижней границей интервала, а  $m_2 = m^* + \varepsilon$  — верхней границей;  $2\varepsilon$  — точность оценки параметра.

Точное построение доверительных интервалов сводится к следующему. Любой доверительный интервал находится из условия, выражающего вероятность выполнения неравенства, в которое входит оценка  $m^*$ .

В общем случае закон распределения  $m^*$  зависит от самих неизвестных параметров (в том числе и  $m$ ) и закона распределения наблюдаемой случайной величины. Однако в неравенствах иногда удается перейти от случайной величины  $m^*$  к какой-либо другой функции наблюдаемых значений  $t_1, t_2, \dots, t_i, \dots, t_n$ , закон распределения которой не зависит от неизвестных параметров, а зависит только от числа испытаний  $N$  и от вида закона распределения наблюдаемой случайной величины.

Так, для случая нормального распределения случайной величины  $t$  другая случайная величина, подсчитанная как

$$\begin{aligned} T &= \sqrt{N} \frac{m^* - m}{\sqrt{D^*}}, \quad \text{где } m^* = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i, \quad D^* = \\ &= \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (t_i - m^*)^2, \end{aligned}$$

подчиняется закону распределения Стьюдента с  $(N-1)$  степенями свободы [5]. При этом величина  $\varepsilon$  для математического ожидания с заданной доверительной вероятностью  $\beta$  будет равна  $\varepsilon_\beta = t_\beta \sqrt{\frac{D^*}{N}}$ , где  $t_\beta$  — коэффициент Стьюдента, определяемый по табличным данным [5, 9] по доверительной вероятности и числу степеней свободы.

Доверительный интервал для математического ожидания будет равен

$$I_{\beta} \left( m^* - t_{\beta} \sqrt{\frac{D^*}{N}}; m^* + t_{\beta} \sqrt{\frac{D^*}{N}} \right).$$

Для этого же нормального распределения случайная величина, подсчитанная как  $V = \frac{(N-1) D^*}{D}$ , имеет распределение  $\chi^2$  с  $(N-1)$  степенями свободы. Данное распределение несимметрично. Поэтому доверительный интервал выбирается из соображений, что вероятности выхода величины  $V$  за его пределы влево и вправо одинаковы и равны  $\frac{\alpha}{2} = \frac{1-\beta}{2}$ . Для нижней границы эта вероятность равна  $P_1 = \frac{\alpha}{2}$ , для верхней  $P_2 = 1 - \frac{\alpha}{2}$ .

Величины  $\chi_1^2$  и  $\chi_2^2$  определяются по табличным данным, по вероятностям  $P_1, P_2$  и числу степеней свободы. При этом доверительный интервал для дисперсии будет равен

$$I'_{\beta} \left( \frac{D^* (N-1)}{\chi_1^2}; \frac{D^* (N-1)}{\chi_2^2} \right).$$

В [23] приведены доверительные интервалы для некоторых основных законов распределений.

### Примеры оценки показателей надежности

*Пример 1. Экспоненциальный закон распределения.*

*План  $[N, U, T]$*

Под наблюдение поставлено 25 изделий на время 25000 ч. За это время отказало 10 изделий с наработкой соответственно 90, 150, 220, 250, 410, 500, 700, 1150, 1500, 1800.

Известно, что наработки до отказа ( $t_i$ ) подчинены экспоненциальному закону распределения. Отказ считается предельным состоянием.

Требуется определить оценки показателей надежности: среднего ресурса, вероятности безотказной работы за  $t = 1000$  ч, интенсивность отказов, гамма-процентный ресурс при  $\gamma = 90\%$ . Доверительная вероятность  $\beta = 0,9$ .

1. По формулам табл. 2 [23] для плана  $[N, U, T]$  имеем

$$\lambda^* = \frac{n}{\sum_{i=1}^n t_i + (N-n) T} = \frac{10}{6770 + (25-10) 2500} = 0,00023.$$

По формулам табл. 2. приложения 2 [23] с доверительной

вероятностью  $\beta = 0,9$  находим двусторонние границы. Величины  $\chi^2_{p,2n}$  находим по приложению 5 [23].

$$\lambda_{\text{н}} = \frac{\lambda^* N \chi^2_{1-\beta, 2n}}{n \left( 2n - n + \frac{1}{2} \chi^2_{1-\beta, 2n} \right)} = \frac{0,00023 \cdot 25 \cdot 10,9}{10 \left( 2 \cdot 25 - 10 + \frac{1}{2} \cdot 10,9 \right)} = 0,00014;$$

$$\lambda_{\text{в}} = \frac{\lambda^* N \chi^2_{1-\beta, 2n}}{n \left( 2n - n + \frac{1}{2} \chi^2_{1-\beta, 2n} \right)} = \frac{0,00023 \cdot 25 \cdot 31,4}{10 \left( 2 \cdot 25 - 10 + \frac{1}{2} \cdot 31,4 \right)} = 0,00032.$$

Итак,  $0,00014 < \lambda < 0,00032$ , т. е. интервал  $(0,00014—0,00032)$  с вероятностью 0,9 покрывает неизвестный параметр  $\lambda$ .

2. По формулам табл. 1 [23] определим средний ресурс и его доверительные границы:

$$T_{\text{р ср}} = \frac{1}{\lambda^*} = \frac{1}{0,00023} = 4348 \text{ ч};$$

$$T_{\text{р ср н}} = \frac{1}{\lambda_{\text{н}}} = \frac{1}{0,00032} = 3125 \text{ ч};$$

$$T_{\text{р ср в}} = \frac{1}{\lambda_{\text{в}}} = \frac{1}{0,00014} = 7143 \text{ ч}.$$

Итак,  $3125 < T_{\text{р ср}} < 7143$  ч, т. е. интервал  $(3125—7143)$  с вероятностью 0,9 покрывает истинное значение среднего ресурса.

3. Определим оценку вероятности безотказной работы изделия за время  $t = 1000$  ч.

По табл. 1 [23] имеем:

$$P(t) = e^{-\lambda t};$$

$$P(1000) = e^{-0,00023 \cdot 1000} = 0,79;$$

$$P_{\text{н}}(1000) = e^{-0,00032 \cdot 1000} = 0,73;$$

$$P_{\text{в}}(1000) = e^{-0,00014 \cdot 1000} = 0,87.$$

Интервал  $(0,73—0,87)$  с вероятностью 0,9 покрывает истинное значение вероятности безотказной работы, а ее среднее значение 0,79.

4. Интенсивность для экспоненциального закона распределения не зависит от времени и равна  $\lambda^* = 0,00023$  (см. п. 1).

5. Определим  $\gamma$ -процентный ресурс:

$$T_{\text{р } \gamma}^* = \frac{1}{\lambda^*} \left( -\ln \frac{\gamma}{100} \right) = \frac{1}{0,00023} \left( -\ln \frac{90}{100} \right) = 458 \text{ ч};$$

$$T_{\text{р } \gamma \text{ н}} = \frac{1}{\lambda_{\text{н}}} \left( -\ln \frac{\gamma}{100} \right) = \frac{1}{0,00032} \left( -\ln \frac{90}{100} \right) = 329 \text{ ч};$$

$$T_{P_{i^*}} = \frac{1}{\lambda_n} \left( -\ln \frac{\gamma}{100} \right) = \frac{1}{0,00014} \left( -\ln \frac{90}{100} \right) = 752 \text{ ч.}$$

Итак, интервал (329—752) с вероятностью 0,9 покрывает истинное значение 90%-го ресурса.

Пример 2. Закон распределения Вейбулла. План [NUN].

Используем данные примера 1. Известно, что наработка подчиняется закону Вейбулла и  $N = 10$ . Требуется определить параметры распределения  $\lambda$  и  $m$ , их доверительные границы при  $\beta = 0,9$ , оценку среднего ресурса, вероятности безотказной работы за время  $t = 300$  ч, 90%-й ресурс.

1. По формулам табл. 4 [23] для плана наблюдения [NUN] определим  $\lambda^*$  и  $m^*$  графическим способом. Для этого перепишем вторую формулу в виде

$$\frac{N}{m^*} + \sum_{i=1}^N \ln t_i = \frac{N \sum_{i=1}^N t_i^{m^*} \ln t_i}{\sum_{i=1}^N t_i^{m^*}}$$

и обозначим:

$$\frac{N}{m^*} + \sum_{i=1}^N \ln t_i = y_1(m); \quad (1)$$

$$\frac{N \sum_{i=1}^N t_i^{m^*} \ln t_i}{\sum_{i=1}^N t_i^{m^*}} = y_2(m). \quad (2)$$

Подставляя в формулы (1) и (2) различные значения  $m^*$ , получим:

$$m = 0,5, \quad y_1(0,5) = \frac{10}{0,5} + 59,06 = 79,06;$$

$$m = 1, \quad y_1(1) = \frac{10}{1} + 59,06 = 69,06;$$

$$y_2(1) = \frac{10 \cdot 46453}{6770} = 68,61;$$

$$m = 1,5, \quad y_1(1,5) = 65,73; \quad y_2(1,5) = 70,74;$$

$$m = 2, \quad y_1(2) = 64,06; \quad y_2(2) = 71,99 \text{ и т. д.}$$

Графики  $y_1(m)$  и  $y_2(m)$  пересекаются в точке, абсцисса которой соответствует  $m^* = 1,1$ .

$$\text{Тогда} \quad \lambda^* = \frac{N}{\sum_{i=1}^N t_i^{m^*}} = \frac{10}{13569,82} = 0,00074.$$

$$\text{Итак,} \quad m^* = 1,1; \\ \lambda^* = 0,00074.$$

2. При определении доверительных интервалов для  $m$  и  $\lambda$  используем формулы табл. 3.4 приложения 2 [23]:

$$D(\lambda^*) = \frac{\frac{10}{1.1^2} + 0,00074 \cdot 655650,76}{\frac{10}{0,00074^2} \frac{10}{1.1^2} + 0,00074 \cdot 655650,76 - 103214,44^2} = 0,000000052.$$

По табл. 6 приложения 3 [23] для  $\beta = 0,9$   $z_{\beta} = 1,645$ . Тогда двусторонние доверительные интервалы будут равны:

$$\lambda_n = 0,00074 - 1,645 \sqrt{0,000000052} = 0,000365,$$

$$\lambda_n = 0,00074 + 1,645 \sqrt{0,000000052} = 0,001115.$$

Таким образом, интервал (0,000365 — 0,001115) с вероятностью 0,9 покрывает истинное значение  $\lambda$ :

$$D(m^*) = \frac{10}{\frac{0,00074^2}{9450036375,5}} = 0,00193;$$

$$m_n = 1,1 - 1,645 \cdot 0,044 = 1,028;$$

$$m_n = 1,1 + 1,645 \cdot 0,044 = 1,172.$$

Интервал (1,028—1,172) с вероятностью 0,9 покрывает истинное значение  $m$ .

3. По табл. 1 [23] находим оценки показателей надежности. Средний ресурс

$$T_{\text{р ср}} = \frac{\Gamma\left(1 + \frac{1}{m^*}\right)}{\lambda^* \frac{1}{m^*}} = \frac{\Gamma\left(1 + \frac{1}{1,1}\right)}{0,00074 \frac{1}{1,1}} = 607 \text{ ч.}$$

Вероятность безотказной работы за время 300 ч

$$P^*(500) = e^{-\lambda^* t^{m^*}} = e^{-0,00074 \cdot 300^{1,1}} = 0,96.$$

90%-й ресурс

$$T_{P_1} = \left[ \frac{1}{\lambda^*} \left( -\ln \frac{\gamma}{100} \right) \right]^{\frac{1}{m^*}} = \left[ \frac{1}{0,00074} \cdot 0,1054 \right]^{\frac{1}{1,1}} = 90 \text{ ч.}$$

Этот показатель можно вычислить также следующим образом:

$$P(t) = e^{-\lambda^* t^{m^*}} = 0,9;$$

$$e^{-0,00074 t^{1,1}} = 0,9,$$

откуда  $t_{\gamma} = T_{P_1} = 90 \text{ ч.}$

Пример 3. *Нормальный закон распределения.*

План  $[N, U, T]$ .

Под данным примера 1 определить среднюю наработку до отказа, вероятность безотказной работы за время 1000 ч. Интенсивность отказов за то же время.

1. По формулам табл. 5 и табл. 11 приложения 2 [23] путем последовательного подставления табличных значений  $K$  и  $f_1(K)$  определим:

$$K = 0,2; f_1(K) = 0,675.$$

2. По формулам табл. 5 [23] находим:

$$\sigma_t^* = \frac{2500 - \frac{1}{10} \cdot 6770}{\frac{25 - 10}{10} \cdot 0,675 - 0,2} = 2250;$$

$$m_t^* = 0,2 \cdot 2250 + 2500 = 2950.$$

3. По данным табл. 6 приложений 2 и 3 [23] определим двусторонние доверительные границы для  $m_t$  и  $\sigma_t$ :

$$m_{t_{\text{н}}} = 2950 - 1,645 \cdot \frac{2250}{\sqrt{25}} \sqrt{1,863} = 1940 \text{ ч};$$

$$m_{t_{\text{в}}} = 2950 + 1,645 \cdot \frac{2250}{\sqrt{25}} \sqrt{1,863} = 3960 \text{ ч}.$$

Интервал (1940—3960) с вероятностью 0,9 покрывает постоянное значение  $m_t$ :

$$\sigma_{t_{\text{н}}} = 2250 - 1,645 \cdot \frac{2250}{\sqrt{25}} \sqrt{1,523} = 1337 \text{ ч};$$

$$\sigma_{t_{\text{в}}} = 2250 + 1,645 \cdot \frac{2250}{\sqrt{25}} \sqrt{1,523} = 3163 \text{ ч}.$$

Интервал (1337—3163) с вероятностью 0,9 покрывает истинное значение  $\sigma_t$ .

4. Определим оценки показателей надежности, используя средний ресурс табл. 1 [23].

Средний ресурс

$$T_{\text{р ср}} = m_t^* = 2950 \text{ ч}.$$

Вероятность безотказной работы за время  $t = 1000$  ч

$$P(1000) = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \Phi\left(\frac{t - m_t^*}{\sigma_t^*}\right) = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \Phi\left(\frac{1000 - 2950}{2250}\right) = 0,81.$$

Интенсивность отказов за время  $t = 1000$  ч

$$\lambda^* = \frac{\frac{1}{\sigma_t^*} f_0\left(\frac{t - m_t^*}{\sigma_t^*}\right)}{\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \Phi\left(\frac{t - m_t^*}{\sigma_t^*}\right)} = \frac{\frac{1}{2250} f_0\left(\frac{1000 - 2950}{2250}\right)}{\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \Phi\left(\frac{1000 - 2950}{2250}\right)} = 0,00015 \text{ 1/ч}.$$

Пример 4. Логарифмически-нормальный закон распределения. План  $\{N, U, T\}$

По данным примера 1 определить параметры  $m_e$  и  $\sigma_e$ , их доверительные границы с доверительной вероятностью  $\beta = 0,9$ , а также показатели надежности — среднюю наработку до отказа, вероятность безотказной работы изделия за время  $t = 1000$  ч, интенсивность отказов за это же время.

1. Аналогично п. 1 примера 3 по приложениям 1, 2, 3 [23] определим:

$$K = 0,2 f_1(K) = 0,675.$$

2. Далее находим:

$$\sigma_e^* = \frac{2500 - \frac{1}{10} \cdot 61,06}{\frac{25 - 10}{10} \cdot 0,675 - 0,2} = 2,116;$$

$$m_e^* = 0,2 \cdot 2 \cdot 116 + 7,824 = 8,247.$$

3. Двусторонние доверительные границы будут равны:

$$z_{0,9} = 1,645; \quad f_2(K) = 1,863; \quad f_3(K) = 1,523;$$

$$m_{e_{\text{ни}}} = 8,247 - 1,645 \cdot \frac{2,116}{\sqrt{25}} \sqrt{1,863} = 7,297;$$

$$m_{e_{\text{в}}} = 8,247 + 1,645 \cdot \frac{2,116}{\sqrt{25}} \sqrt{1,863} = 9,197.$$

Интервал (7,297 — 9,197) с вероятностью 0,9 покрывает истинное значение параметра.

$$\sigma_{e_{\text{ни}}} = 2,116 - 1,645 \cdot \frac{2,116}{\sqrt{25}} \sqrt{1,523} = 1,710;$$

$$\sigma_{e_{\text{в}}} = 2,116 + 1,645 \cdot \frac{2,116}{\sqrt{25}} \sqrt{1,523} = 2,522.$$

Интервал (1,710 — 2,522) с вероятностью 0,9 покрывает истинное значение  $\sigma_e$ .

4. Определим оценки показателей надежности.

Средний ресурс

$$T_{\text{р.ср}} = m_t^* = e^{8,247 + 1/2 \cdot 2,116^2} = 36020.$$

Вероятность безотказной работы

$$P^*(1000) = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \Phi\left(\frac{\ln 1000 - 8,247}{2,116}\right) = 0,73.$$

Интенсивность отказов

$$\lambda^*(1000) = \frac{1}{1000 \cdot 2,116} f\left(\frac{\ln 1000 - 8,247}{2,116}\right) = 0,00021.$$

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Основные направления экономического и социального развития СССР на 1986—1990 годы и на период до 2000 года: Постановление XXVII съезда КПСС от 7 марта 1986 г.
2. ГОСТ 27.002-83. Надежность в технике. Термины и определения. — М.: Изд-во стандартов, 1983. — 30 с.
3. ГОСТ 15467-79. Управление качеством продукции. Основные понятия, термины и определения. — М.: Изд-во стандартов, 1979. — 26 с.
4. Акимов В. М. Основы надежности газотурбинных двигателей: Учебник для студентов машиностроительных специальностей высших учебных заведений. — М.: Машиностроение, 1981. — 207 с.
5. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. — М.: Наука, 1969. — 376 с.
6. Самолет Ту-154. Конструкция и техническое обслуживание / Ф. А. Волошин, А. Н. Кузнецов, В. Я. Покровский и др. — М.: Машиностроение, 1975. — 392 с.
7. Косточник В. В. Надежность авиационных двигателей и силовых установок. — М.: Машиностроение, 1976. — 248 с.
8. Техническая эксплуатация летательных аппаратов: Учебник для вузов гражданской авиации. / Под ред. А. И. Пугачева. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Транспорт, 1977. — 440 с.
9. Смирнов Н. В., Дунин-Барковский И. В. Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений. — 3-е изд., стереотипное. — М.: Наука, 1969. — 512 с.
10. Базовский И. Надежность. Теория и практика. — М.: Мир, 1965. — 374 с.
11. Цейтлин В. И. Конструкционная прочность материалов, применяемых в ДЛА: Учебное пособие / Под ред. проф. А. И. Белоусова. — Куйбышев: КуАИ, 1985. — 86 с.
12. Проников А. О. Надежность машин. Межиздательская серия «Надежность и качество». — М.: Машиностроение, 1978. — 572 с.
13. Соломонов П. А. Надежность планера самолета. — М.: Машиностроение, 1974. — 320 с.
14. Кузнецов Н. Д., Цейтлин В. И. Эквивалентные испытания ГТД. — М.: Машиностроение, 1976. — 216 с.
15. Бойцов Б. В. Надежность шасси самолета. — М.: Машиностроение, 1976. — 216 с.
16. Цейтлин В. И., Федорченко Д. Г. Оценка циклической долговечности деталей, работающих при сложных программных нагрузениях // Проблемы прочности. — 1983. — № 2. — С. 13—19.
17. Милов Е. А. Анализ эксплуатационной надежности авиационной техники: Методические указания. — Куйбышев: КуАИ, 1981. — 38 с.
18. ГОСТ 16468-79. Надежность в технике. Система сбора и обработки информации. Основные положения. — М.: Изд-во стандартов, 1979. — 8 с.
19. ГОСТ 17510-72. Надежность изделий машиностроения. Система сбора и обработки информации. Планирование наблюдений. — М.: Изд-во стандартов, 1972. — 19 с.
20. Смирнов Н. Н. и др. Эксплуатационная надежность и режимы технического обслуживания самолетов. — М.: Транспорт, 1974. — 303 с.
21. Барзилович Е. Ю. и др. Надежность авиационных систем. — М.: Транспорт, 1982. — 181 с.
22. Кордонский Х. Б. и др. Основы статистического анализа данных о неисправностях и отказах авиационной техники. — Рига: РКИИГА, 1974. — 135 с.
23. ГОСТ 27.503-81 СТ СЭВ 2836-81. Методы оценки показателей надежности = Methods for estimation of reliability indices — Взамен ГОСТ 17504-72; Введ. 01.07.82. — М.: Изд-во стандартов, 1982. — 55 с. УДК 62-192:002:006.354. Группа ТЗ1. СССР.

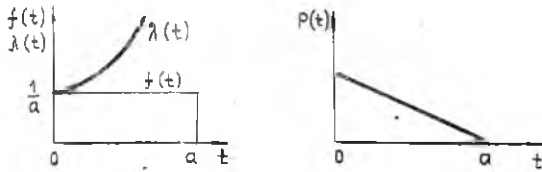




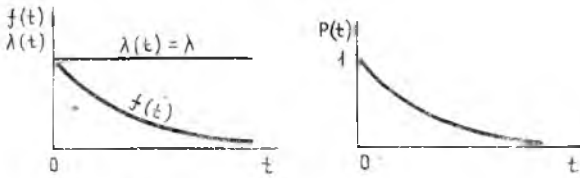


## Приложение 2

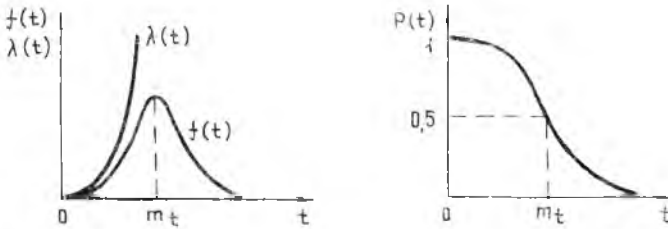
### Равномерное распределение



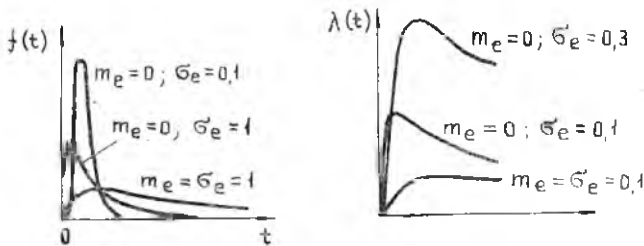
### Экспоненциальное распределение



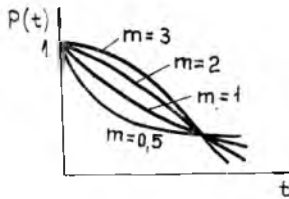
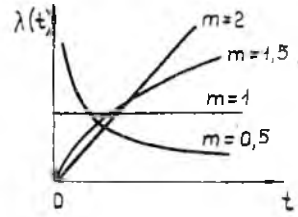
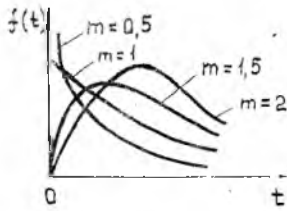
### Нормальное распределение



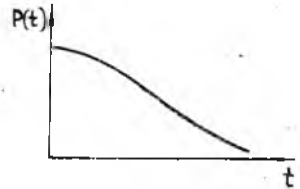
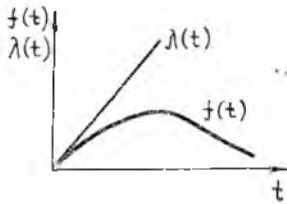
### Логарифмически - нормальное распределение



Распределение Вейбулла



Распределение Релея



## СО Д Е Р Ж А Н И Е

Введение . . . . .	3
1. ПОКАЗАТЕЛИ И ХАРАКТЕРИСТИКИ НАДЕЖНОСТИ . . . . .	5
1.1. Основные понятия, термины и определения . . . . .	5
1.2. Показатели надежности . . . . .	8
1.2.1. Показатели безотказности . . . . .	8
1.2.2. Показатели долговечности . . . . .	12
1.2.3. Показатели ремонтпригодности и сохраняемости . . . . .	14
1.2.4. Комплексные показатели надежности . . . . .	14
1.2.5. Частные показатели надежности . . . . .	15
1.3. Характеристики надежности . . . . .	16
1.3.1. Экспоненциальное распределение . . . . .	18
1.3.2. Распределение Вейбулла . . . . .	19
1.3.3. Нормальное распределение. Усеченное нормальное распределение . . . . .	19
1.3.4. Комбинации законов распределения . . . . .	21
2. НАДЕЖНОСТЬ СИСТЕМ . . . . .	21
2.1. Резервирование и его разновидности . . . . .	21
2.2. Расчет надежности методом структурных схем . . . . .	24
2.2.1. Последовательное соединение элементов . . . . .	24
2.2.2. Надежность при параллельном соединении элементов в системе . . . . .	26
2.2.3. Расчет надежности сложных систем . . . . .	27
2.3. Надежность системы при ненагруженном резерве . . . . .	29
3. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ НАДЕЖНОСТИ ИЗДЕЛИЙ . . . . .	33
3.1. Снижение надежности изделий — следствие изнашивания (старения) их элементов . . . . .	33
3.2. Поверхностный слой и его параметры . . . . .	34
3.3. Сведения о закономерностях изнашивания. Модель формирования постепенного отказа . . . . .	40
3.4. Изнашивание деталей авиационной техники . . . . .	45
4. ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ИЗДЕЛИЙ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ В ПРОЦЕССЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И КОНСТРУКТОРСКОЙ ОТРАБОТКИ (ДОВОДКИ) . . . . .	49
4.1. Основные принципы проектирования надежных изделий авиационной техники . . . . .	49
4.2. Конструкторская отработка (доводка) опытных изделий. Испытания по проверке их надежности . . . . .	55

5. ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ИЗДЕЛИЙ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ В ПРОЦЕССЕ СЕРИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА. . . . .	62
5.1. Конструкционная прочность деталей. Примеры повышения прочности деталей технологическими методами . . . . .	64
5.2. Система предупредительного контроля с целью профилактики качества и надежности изделий . . . . .	69
5.3. Исследование причин отказов серийных изделий авиационной техники. Методика исследования причин отказов . . . . .	72
6. АНАЛИЗ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ . . . . .	76
6.1. Цели и задачи системы сбора и обработки информации о надежности АТ. Планы наблюдений . . . . .	78
6.2. Расчет характеристик надежности авиационной техники . . . . .	82
6.2.1. Определение неизвестных параметров распределений . . . . .	86
6.2.2. Проверка правильности принятой гипотезы . . . . .	90
6.2.3. Определение точности оценок параметров распределения . . . . .	93
Библиографический список . . . . .	102
Приложение 1 . . . . .	103
Приложение 2 . . . . .	105

Доп. плац, 1987, поз. 30

*Константин Алексеевич Жуков,  
Евгений Акимович Милов,  
Николай Иванович Епишев*

ЭКСПЛУАТАЦИОННАЯ НАДЕЖНОСТЬ  
АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

Редактор Т. К. К р е т и н и н а  
Техн. редактор Н. М. К а л е н ю к  
Корректор Н. С. К у п р я н о в а

Сдано в набор 13.10.87 г. ЕО 00384.  
Подписано в печать 2.12.87 г. Бумага оберточная.  
Гарнитура литературная. Усл. п. л. 5,8. Уч.-изд. л. 5,0.  
Т. 700 экз. Заказ 930. Цена 20 к.

Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени  
авиационный институт имени академика С. П. Королева,  
г. Куйбышев, ул. Молодогвардейская, 151.

---

В типографии ЭОЗ КуАИ, г. Куйбышев,  
ул. Ульяновская, 18.