

Прикладная механика (3)
Лекция 1. НАДЕЖНОСТЬ
ХИМИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

К.т.н., доцент каф. Механики
Костюк Елена Геннадиевна

ВОПРОСЫ

- **1.1 Основные характеристики надежности объектов химической промышленности**
- **1.2 Классификация отказов**
- **1.3 Показатели надежности**
- **1.4 Надежность сложных систем**
- **1.5 Особенности химического оборудования, как объекта проектирования**

- **Литература:**
- Марцулевич Н.А., Борисов В.З. Надежность химико-технологических систем: Учебное пособие. – СПб.: Изд-во СПбГУЭФ, 2003. – 149 с.

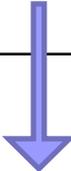
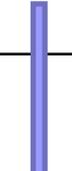
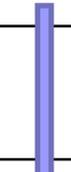
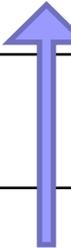
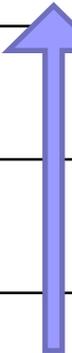
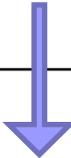
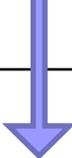
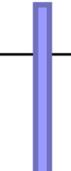
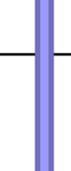
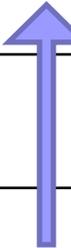
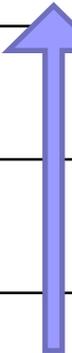
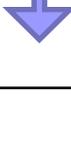
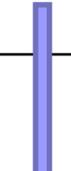
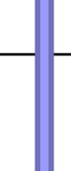
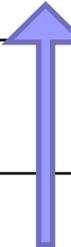
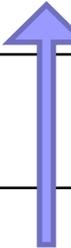
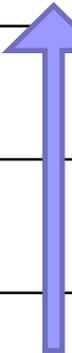
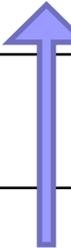
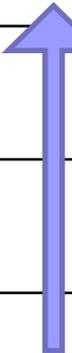
1.1 Основные характеристики надежности объектов химической промышленности

- Под **надежностью** объекта химической промышленности в общем случае понимают свойство ХТС сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих ее способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях функционирования, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортирования.
- Продолжительность работы объекта ХТС называется **наработкой**, а наработка до предельного состояния — **ресурсом**. Разности между текущим и номинальным или предельным значениями параметров отдельных частей системы определяют соответственно его **исправность и остаточный ресурс**. Совокупность отклонений параметров технического состояния изделия, определяющих уровень его работоспособности и исправности, называется **техническим состоянием**.

- **ГОСТ 27. 002 – 89** «Надежность в технике. Термины и определения» дает нам следующие основные понятия:
- В результате эксплуатации **оборудование может находиться в одном из следующих технических состояний:**
- **исправном** (изделие соответствует всем требованиям нормативнотехнической документации);
- **неисправном** (изделие не соответствует хотя бы одному требованию нормативно-технической документации);
- **работоспособном** (значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции на всех режимах, соответствуют требованиям нормативно-технической документации);
- **неработоспособном** (значение хотя бы одного параметра, характеризующего способность выполнять заданную функцию, не соответствует требованиям нормативно-технической документации)

- **функционирующем** (значение всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции на проверенных режимах, соответствуют требованиям нормативно-технической документации);
- **нефункционирующем** (значение хотя бы одного параметра, характеризующего способность выполнять заданные функции на проверенных режимах, не соответствует требованиям нормативно-технической документации).
- Наконец, еще один вид состояния объекта называется **предельным состоянием**. Эксплуатация химического оборудования, находящегося в предельном состоянии, должна быть прекращена вследствие неустранимого нарушения требований безопасности или неустранимого выхода параметров за установленные пределы. Необходим средний или капитальный ремонт ХТС частичной заменой ее составных частей новыми.

Возможные переходы видов технического состояния

Техническое состояние	Дефект			Вид ТО и Р		
	Повреждение	Отказ	Неустраняемый отказ	Поддержка	Текущий ремонт	Капитальный ремонт
Исправное		 	 		 	 
Работоспособное		 	 		 	 
Неработоспособное		 	 		 	 
Предельное			 			 

1.2 Классификация отказов

- Событие, прекращающее работоспособность изделия, называется **отказом**.
- **Под критерием отказа** понимают признак или совокупность признаков неработоспособного состояния объекта, установленные в нормативно-технической и (или) конструкторской документации. Данное определение исходит из того, что каждый элемент химического оборудования, каждая составная часть ХТС имеют свое собственное назначение и выполняют свою конкретную функцию работоспособности. Следовательно, каждому элементу присуща своя конкретная формулировка неработоспособного состояния, которая и служит в качестве критерия отказа. **Критерий отказа позволяет однозначно установить факт потери объектом своей работоспособности.**

- **В соответствии с видом критериев** все отказы делятся на **функциональные и параметрические**.
- При **функциональном отказе** объект теряет способность выполнять свое назначение. При **параметрическом отказе** один или несколько технологических параметров выходят за границы допустимых значений. Функциональный отказ изделия влечет за собой либо проведение ремонтных работ, либо снятие его с эксплуатации.
- **По причинам возникновения** отказы бывают **конструктивные** (несовершенство конструкции изделия), **производственные** (несовершенство технологии, некачественный материал и т.д.) и **эксплуатационные** (некачественное ТО или Р и т.д.).
- **Конструкционным отказом** называют отказ, возникший в результате несовершенства или нарушения установленных правил и (или) норм конструирования объекта.

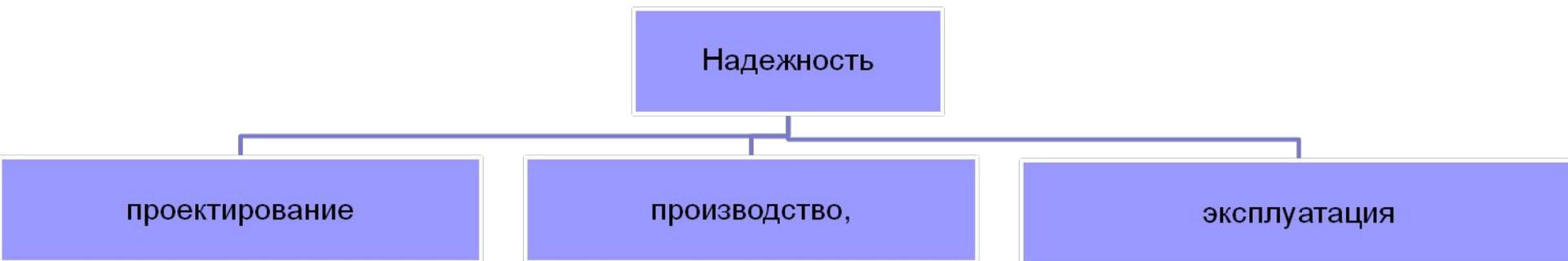
- **Производственным отказом** называют отказ, возникший в результате несовершенства или нарушения установленного процесса изготовления или ремонта объекта.
- **Эксплуатационным отказом** называют отказ, возникший в результате нарушения установленных правил и (или) условий эксплуатации.
- **Характер отказа** зависит *от скорости перехода объекта в неработоспособное состояние*.
- При **внезапном отказе** происходит скачкообразное изменение значений одного или нескольких заданных параметров объекта. Как правило, характер внезапных имеют **функциональные** отказы, обусловленные недостаточной прочностью материала или потерей устойчивости элемента конструкции. Такой же характер имеют **параметрические** отказы, связанные с резким нарушением гидродинамических режимов в технологических аппаратах.

- **Постепенный отказ** характеризуется постепенным изменением значений одного или нескольких заданных параметров объекта.
-
- **По влиянию на работоспособность объекта** различают *отказы его элементов* и *отказы, вызывающие неисправность или отказ объекта в целом*.
-
- **По связи с отказами других элементов** различают *зависимые*, которые обусловлены отказом или неисправностью других элементов изделия, и *независимые* отказы.
- **По влиянию на потери рабочего времени оборудованием** отказы *подразделяют на устраняемые без потери рабочего времени*, т. е. при ТО или в нерабочее (межсменное) время, и *отказы, устраняемые с потерей рабочего времени*.

- Важное значение имеет классификация **отказов по их последствиям**.
- В соответствии с определением **ГОСТа 27.002-89** к последствиям отказа относятся явления, процессы, события и состояния, обусловленные возникновением отказа объекта.
- По степени тяжести последствий отказы ХТС могут варьироваться **от незначительного снижения качества конечного продукта до глобальных техногенных катастроф**.
- Анализ отказов с точки зрения их последствий и причин позволяет выяснить, какого рода дефекты, неисправности или ошибки приводят к наиболее нежелательным ситуациям.

1.3 Показатели надежности

- **Надежность** — это **комплексное свойство** объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих возможность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, ремонта, хранения и транспортирования. Надежность определяет возможность эффективного использования оборудования, трудовых и материальных ресурсов.





Безотказность — это свойство оборудования непрерывно сохранять работоспособность в течение определенного времени его эксплуатации. Она характеризуется вероятностями отказа, безотказной работы и др.

Долговечность — свойство оборудования сохранять работоспособность до наступления предельного состояния при установленной системе проведения работ ТО и Р.

Ремонтопригодность — свойство оборудования или агрегата ХТС, заключающееся в его приспособленности к предупреждению и обнаружению отказов и неисправностей, по поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путем проведения ТО и Р.

Сохраняемость — свойство оборудования или агрегата непрерывно сохранять исправное и работоспособное состояние в течение и после хранения и транспортирования, которое характеризуется средним сроком сохранности изделия.

Основные пути повышения надежности:

- проектирование по возможности простых изделий с меньшим числом деталей;
- рационально использовать высокопрочные материалы и упрочняющую технологию;
- хорошая система смазки;
- применение предохранительных устройств;
- использование стандартных узлов и деталей;
- параллельное соединение элементов и так называемое резервирование;
- ремонтнопригодность (доступность к узлам и деталям для осмотра и замены. Сменные детали должны быть взаимозаменяемыми с запасными частями).

■ Количественно надежность может характеризоваться большим числом показателей.

■ Так, ГОСТ 27.002-89 «Надежность в технике. Термины и определения» вводит 21 показатель надежности.

■ Дадим определения только тем количественным характеристикам, которые целесообразно использовать для оценки надежности ХТС.

- **К показателям безотказности относятся:**
- **- вероятность безотказной работы –** вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ не произойдет;
- **- средняя наработка до отказа –** математическое ожидание наработки до отказа;
- **- средняя наработка на отказ –** отношение наработки восстанавливаемого объекта к математическому ожиданию числа его отказов в течение этой наработки.

■ **Вероятность безотказной работы $R(t)$** за наработку (t) определяется (рис.1.1, а) отношением числа случаев безотказной работы к общему числу рассматриваемых случаев n :

$$R(l) = \frac{n - m(l)}{n} = 1 - \frac{m(l)}{n},$$

■ где $m(t)$ — число отказавших изделий за наработку t .
Вероятность безотказной работы оборудования (или коэффициент надежности) выражается произведением коэффициентов надежности составляющих элементов:

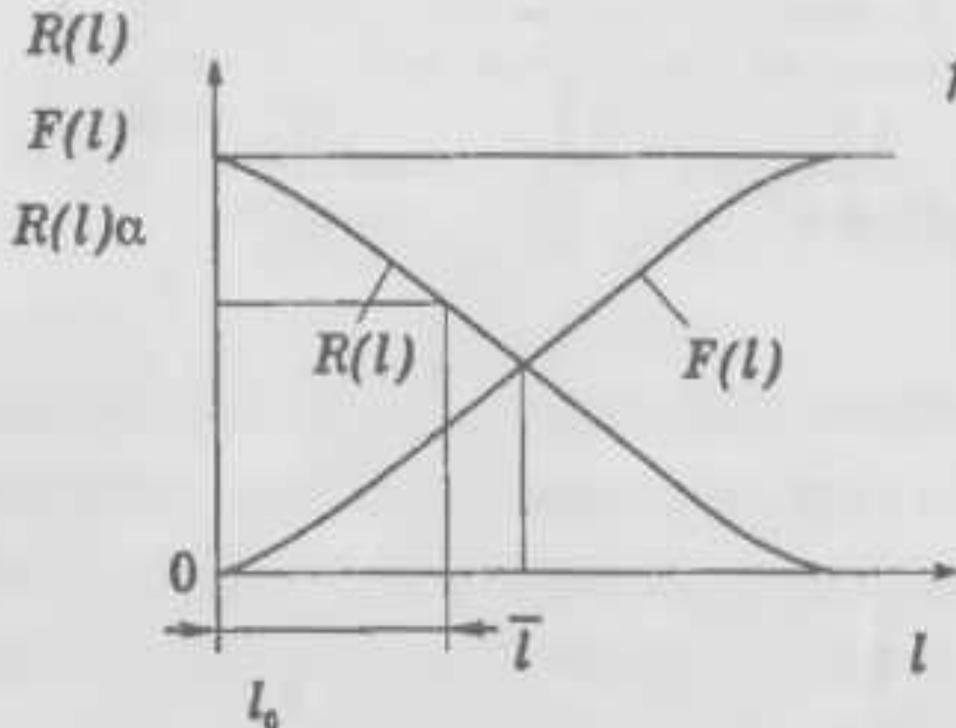
$$P(t) = P_1(t)P_2(t)\dots P_n(t)$$

■ **Вероятность отказа $F(t)$** является противоположным $R(t)$ событием безотказной работы и равна

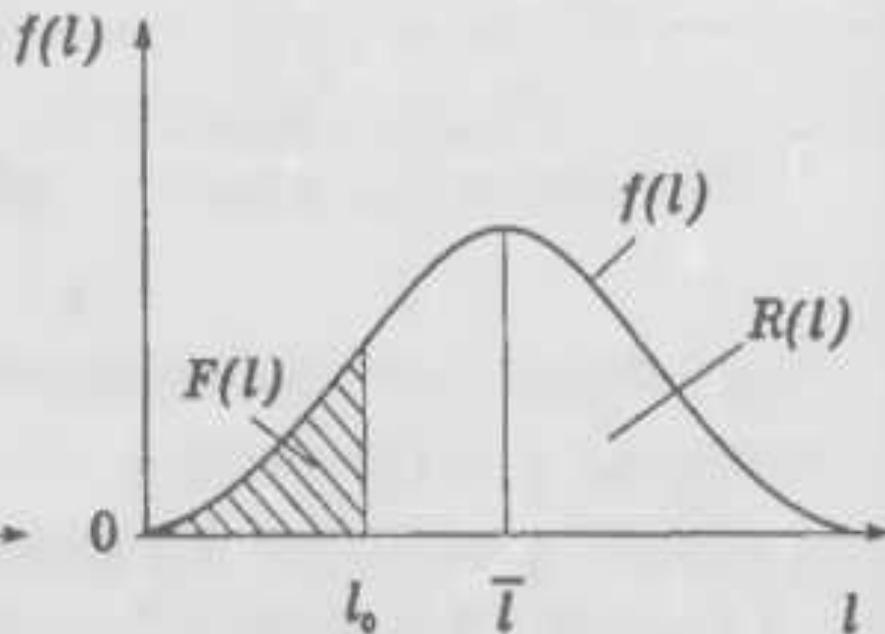
$$F(l) = 1 - R(l) = \frac{m(l)}{n}.$$

- Рис.1.1- Интегральная (а) и дифференциальная (б) функции распределения: $R(t)$ — допустимая вероятность безотказной работы; t, t_0 — средняя наработка до отказа и наработка при допустимой вероятности безотказной работы $R(t)$

а



б



- **Плотность вероятности отказа $f(t)$** (дифференциальная функция, закон распределения случайной величины) (рис. 1.1, б), т.е. вероятность отказа за малую наработку, равна

$$f(l) = F'(l) = \frac{dm(l)}{dl} \frac{1}{n}.$$

- Величины $R(t)$, $F(t)$ и $f(t)$ используют для назначения гарантийного срока эксплуатации, времени выполнения работ по техническому обслуживанию (ТО) и ремонту (Р), для определения количества запасных частей и т.д.
- Вероятность безотказной работы учитывает большинство факторов, существенно влияющих на надежность элементов, и характеризует изменение надежности во времени.

Среднее время безотказной работы — это математическое ожидание времени исправной работы.

Среднее время безотказной работы ***t_{ср}***:

$$t_{ср} = \int_0^{\infty} R(t) dt.$$

Время ***t_{ср}*** на основании экспериментальных данных может быть определено по формуле

$$t_{ср} = \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{N}$$

где ***t_i*** — время безотказной работы *i*-го элемента; ***N*** — число испытываемых элементов.

По величине времени ***t_{ср}*** можно судить о надежности элементов, определять число запасных элементов для работы в течение календарного времени

Частота отказов — это плотность вероятности времени работы элемента с момента включения до отказа. Вероятность безотказной работы $R(t)$ связана с частотой отказов $a(t)$ соотношением

$$1 - R(t) = \int_0^t a(t) dt = F(t).$$

Для определения частоты отказов на основании экспериментальных данных служит отношение

$$a(t) = \Delta n / N_0 \Delta t,$$

Где Δn — число элементов, отказавших за интервал времени Δt ; N_0 — первоначальное число испытываемых элементов.

По величине частоты отказов $a(t)$ можно судить о числе элементов, которые могут выйти из строя в каком-то промежутке времени.

- **Опасность (интенсивность) отказов** — это условная плотность вероятности времени до отказа в момент времени t при условии, что элемент не отказал до момента времени t .
- Опасность отказов $\lambda(t)$ связана с частотой отказов и вероятностью безотказной работы отношением

$$\lambda(t) = a(t) / R(t).$$

- Величина $\lambda(t)$ на основании экспериментальных данных определяется отношением

$$\lambda(t) = \Delta n / N(t) \Delta t,$$

где Δn — число элементов, отказавших за интервал времени Δt ; $N(t) = (N_n + N_k) / 2$; N_n — число исправно работающих элементов в начале интервала Δt ; N_k — число исправно работающих элементов в конце интервала Δt .

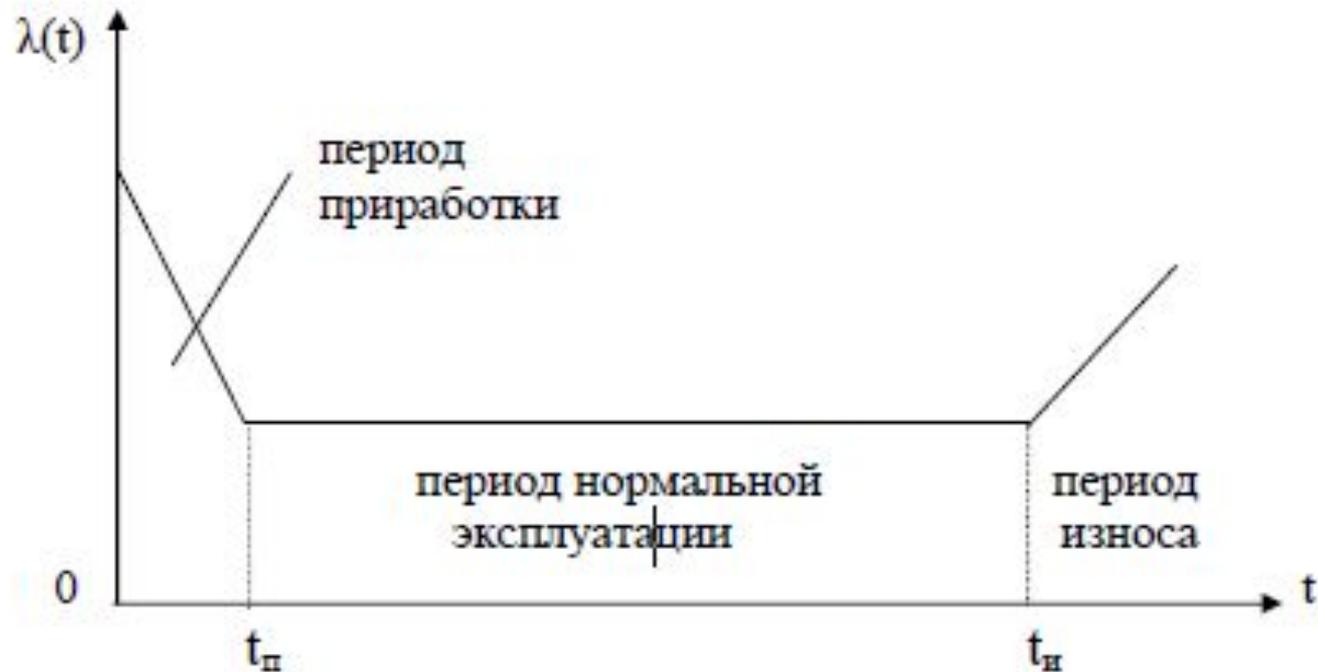


Рис 1.2

Опасность отказов большинства элементов изменяется с течением времени.

Обычно четко выражены три характерных участка периода работы элемента:

участок $0—t_1$ — период приработки и ранних отказов, который характеризуется повышенным числом отказов из-за скрытых дефектов;

участок $t_1—t_2$ — период нормальной работы, во время которой опасность отказов снижается и становится почти постоянной величиной;

участок от t_2 , и далее — период старения, на котором опасность отказов вновь возрастает.

Мгновенная интенсивность отказов

Мгновенная интенсивность отказов определяется как предел интенсивности отказов при длине интервала стремящейся к нулю

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{\Delta t \cdot R(t)} = \frac{1}{R(t)} \left(-\frac{dR(t)}{dt} \right) = \frac{1}{R(t)} \cdot \frac{dF(t)}{dt} = \frac{f(t)}{R(t)}$$

При любом законе распределения отказов существует следующая зависимость между количественными характеристиками $\lambda(t)$ и $R(t)$:

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}$$

Зная опасность отказов $\lambda(t)$, можно найти $R(t)$, а затем из приведенных выше соотношений определить остальные количественные характеристики надежности.

Основными показателями долговечности являются:

- **средний ресурс** – математическое ожидание наработки объекта от начала его эксплуатации или ее возобновления после ремонта до перехода в предельное состояние;
- **гамма-процентный ресурс** – наработка, в течение которой объект не достигнет предельного состояния с заданной вероятностью γ , выраженной в процентах;
- **средний срок службы** – математическое ожидание календарной продолжительности периода от начала эксплуатации или ее возобновления после ремонта до перехода в предельное состояние.

Основные показатели ремонтпригодности включают:

- вероятность восстановления работоспособного состояния
- вероятность того, что время восстановления работоспособности объекта не превысит заданного;
- среднее время восстановления работоспособного состояния – математическое ожидание времени восстановления работоспособного состояния.

Главным показателем ремонтпригодности является среднее время устранения отказа элемента (агрегата, узла и т.д.), которое вычисляется по формуле

$$\bar{t}_i = \frac{1}{n} \sum_{1}^n t_i,$$

где n — количество устраненных отказов i -го элемента;
 t_i — время устранения i -го отказа.

- Наконец, числовыми характеристиками сохраняемости служат:
- - средний срок сохраняемости – математическое ожидание календарной продолжительности хранения и (или) транспортирования объекта, в течение и после которой сохраняются значения показателей безотказности, долговечности и ремонтпригодности в установленных пределах;
- - гамма-процентный срок сохраняемости – срок сохраняемости, который будет достигнут объектом с заданной вероятностью γ , выраженной в процентах.
- *Все перечисленные характеристики относятся к так называемым единичным показателям надежности: они дают количественную оценку только одной составляющей надежности объекта. При эксплуатации сложного химического оборудования очень часто нет необходимости детально анализировать отдельные составляющие надежности; достаточно знать вероятность того, что в данный момент времени оборудование находится в работоспособном состоянии.*

- **К комплексным показателям надежности относятся:**
 - **- коэффициент готовности** – вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме тех периодов, в которые эксплуатация не предусматривается;
 - **- коэффициент технического использования** – отношение математического ожидания времени работоспособного состояния за некоторый период эксплуатации к сумме математических ожиданий времени работоспособного состояния и всех простоев для ремонтов и технического обслуживания.
- **Важнейшим комплексным показателем надежности является коэффициент технической готовности (α_T), представляющий собой отношение времени пребывания оборудования в работоспособном состоянии (D_p) к сумме его и времени простоя в ТО и Р ($D_{ТО,Р}$):**

$$\alpha_T = \frac{D_p}{D_p + D_{ТО,Р}}$$

Распределения, используемые в теории надежности

Исследования надежности химического оборудования позволяет считать, что наработки оборудования в своем большинстве подчиняются следующим четырем распределениям:

- ***экспоненциальному (показательному);***
- ***нормальному;***
- ***логарифмическому нормальному;***
- ***Вейбулла.***

Экспоненциальное распределение характерно для начального периода эксплуатации. В этот период постепенные отказы еще не проявляются и надежность оборудования характеризуется внезапными отказами, которые вызываются неблагоприятным стечением многих обстоятельств и имеют постоянную интенсивность, которая не зависит от возраста изделия.

Например, показательный закон распределения отказов справедлив, если закончился период приработки элементов, а старение материалов сказывается незначительно.

Этот закон распределения характеризуется одним числовым параметром — опасностью отказа $\lambda = \text{const}$ (см. рис. 1.3, а), и формулы для оценки показателей надежности упрощаются:

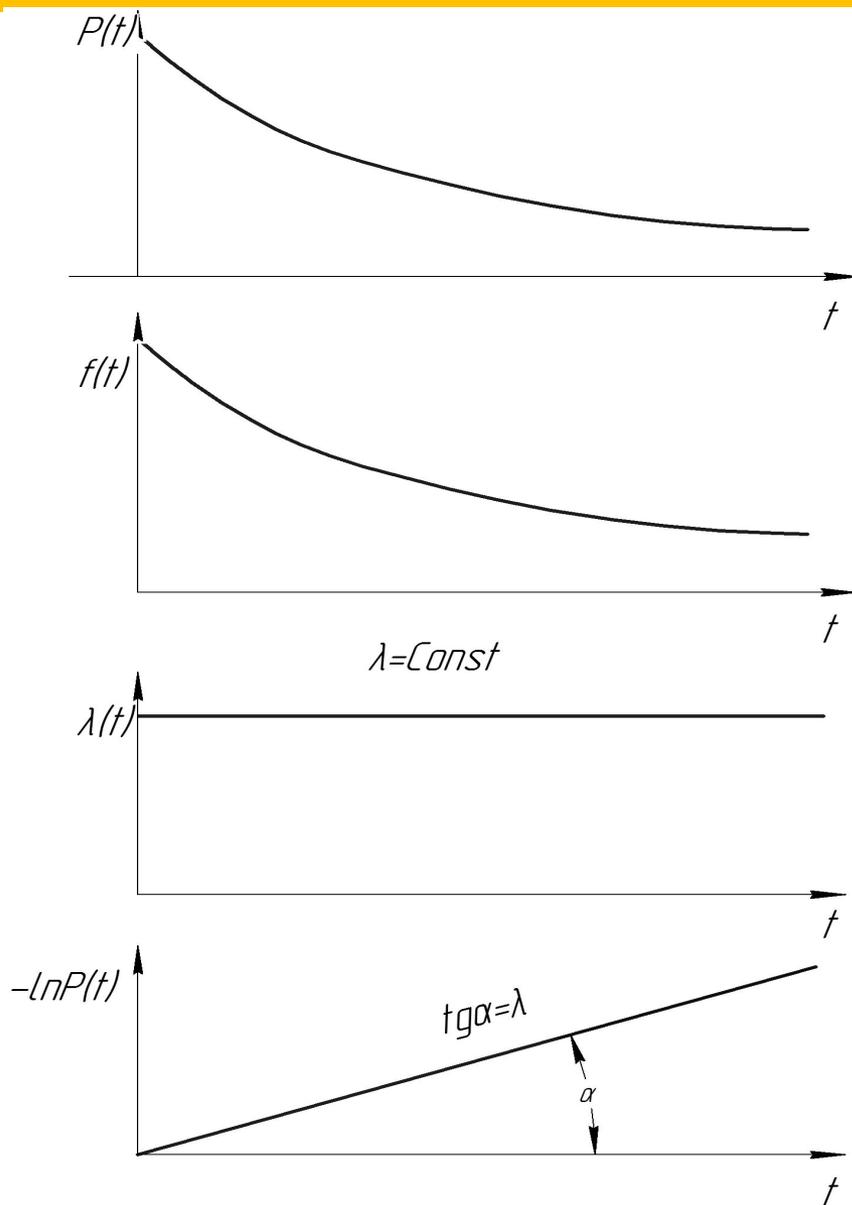
$$R(t) = e^{-\lambda t};$$

$$t_{cp} = 1/\lambda;$$

$$a(t) = \lambda e^{-\lambda t}.$$

Формулы справедливы в случае, если отказы элементов происходят из-за внезапных электрических или механических отказов

Экспоненциальный закон распределения



При исследовании характеристик надежности в период приработки широко используется **распределение Вейбулла** (рис. 1.4, г). Является наиболее приемлемым для элементов, подверженным как внезапным, так и постепенным отказам. Частота отказов при распределении Вейбулла:

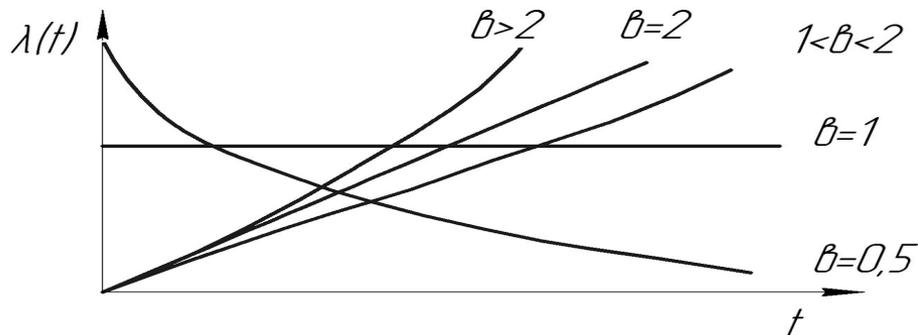
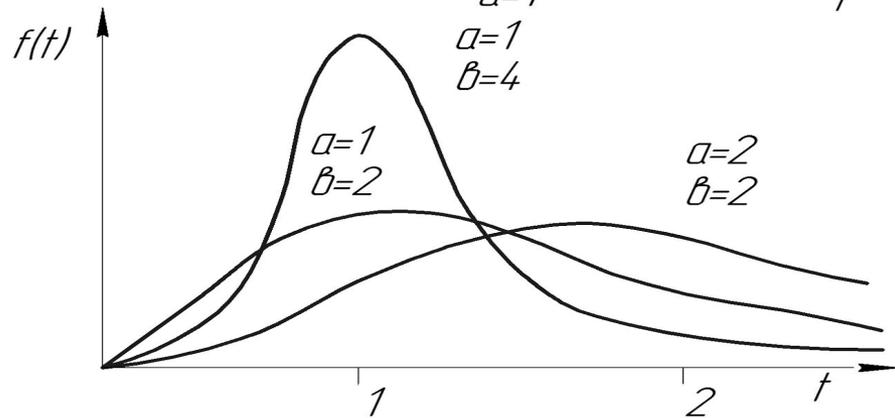
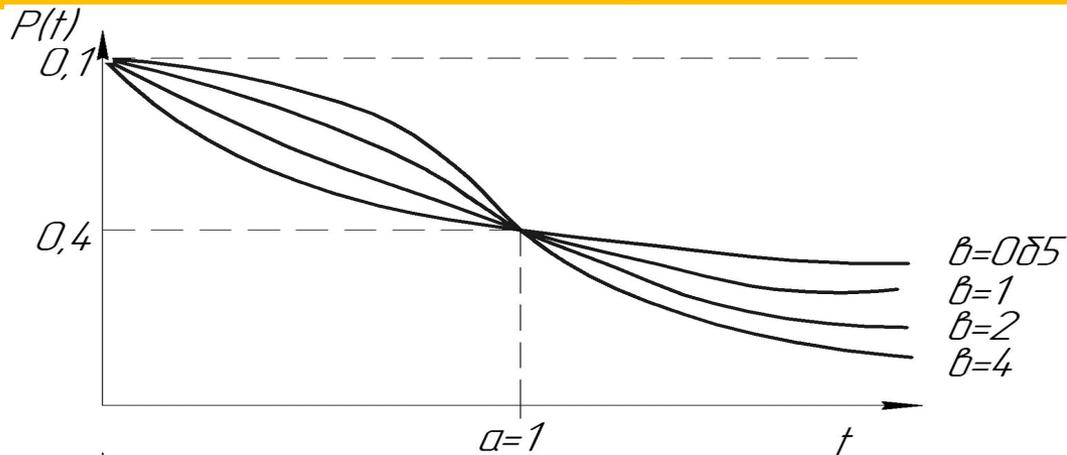
$$a(t) = \lambda_0 k t^{k-1} e^{-\lambda_0 t^k},$$

где λ_0 — параметр, задающий масштаб кривой по оси абсцисс; k — параметр распределения, задающий остроту и асимметрию распределения (рис. 1.4, г).

Количественные характеристики надежности для распределения Вейбулла выражаются следующими соотношениями:

$$R(t) = e^{-\lambda_0 t^k}, \quad \lambda(t) = \lambda_0 k t^{k-1}.$$

Распределение Вейбулла



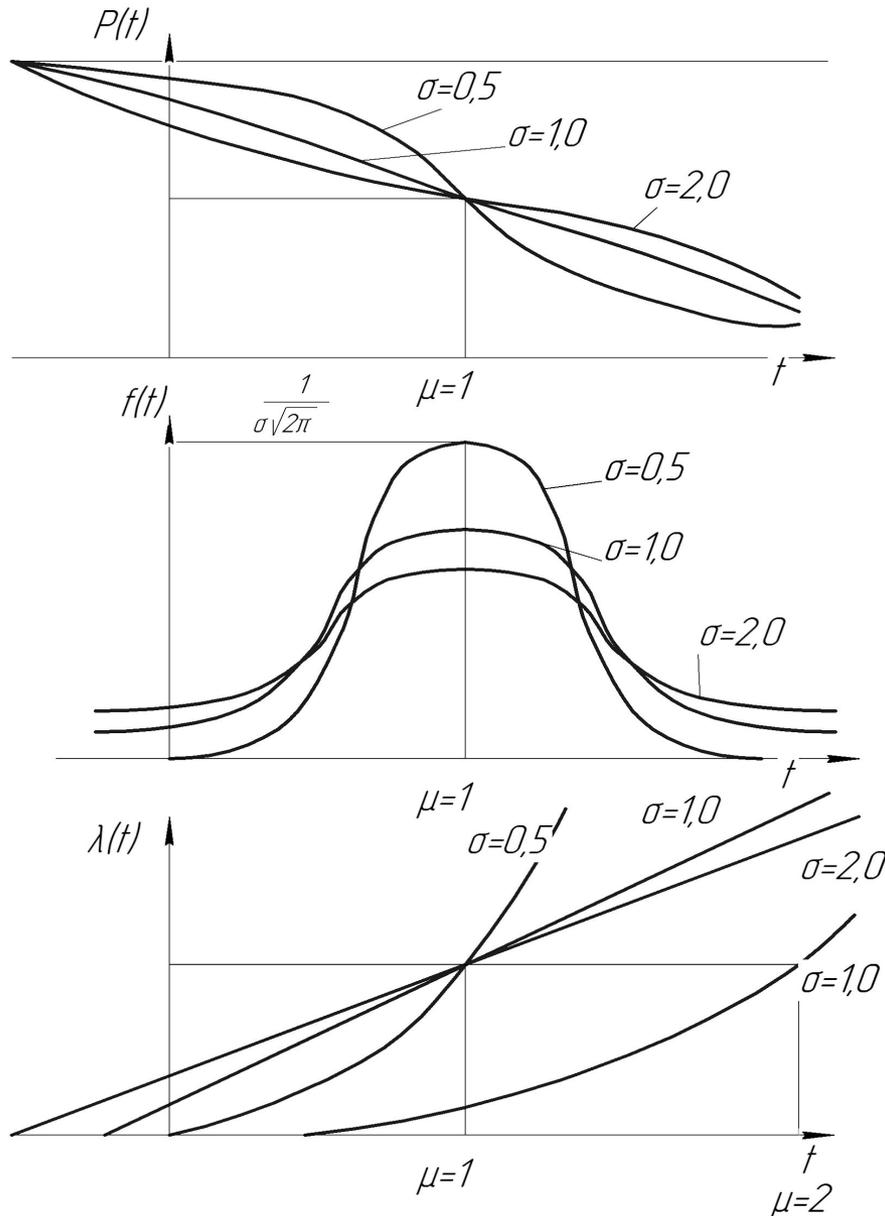
вероятность безотказной работы

плотность вероятности отказов

интенсивность отказов

- Для оценки надежности элементов в начальный период эксплуатации с опасностью отказов, уменьшающейся во времени, служит **гамма-распределение**. Характеристики надежности при этом законе распределения похожи на аналогичные характеристики распределения Вейбулла, поэтому и области их применения приблизительно совпадают.
- При исследовании отказов, возникающих под воздействием какого-либо одного доминирующего эксплуатационного фактора, используют **нормальный закон распределения**. (характерен для постепенных отказов, или их обычно называют износосовые отказы, которые вначале дают низкую плотность распределения, затем максимальную и далее падение, связанное с уменьшением числа работоспособных элементов)
- Находят применение также **законы логарифмически нормального распределения** (описывает наработки до отказа вследствие развития *усталости* и представляет собой логарифм случайной величины распределенной по нормальному закону) и **распределения Релея**

Графическое представление нормального закона



вероятность безотказной работы

плотность вероятности отказов

ИНТЕНСИВНОСТЬ ОТКАЗОВ

1.4 Надежность сложных систем

Если агрегат состоит из n последовательно соединенных элементов, вероятности безотказной работы которых для различных интервалов времени равны $R_1(t), R_2(t), \dots, R_n(t)$, то на основании теоремы умножения независимых событий вероятность безотказной работы устройства

$$R(t) = R_1(t)R_2(t)\dots R_n(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t).$$

Опасность отказов устройства

$$\lambda(t) = \sum_{i=1}^n \lambda_i(t),$$

где $\lambda_i(t)$ — опасность отказа i -го элемента.

В частном случае при показательном законе распределения, когда $\lambda_i(t) = \lambda_i = \text{const}$, вероятность безотказной работы устройства

$$R(t) = e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_i + \dots + \lambda_n)t}.$$

Если устройство состоит из n параллельно соединенных элементов, вероятность отказа которых для различных интервалов времени равна $F_1(t), F_2(t), \dots, F_n(t)$, то

вероятность отказа устройства

$$F(t) = \prod_{i=1}^n F_i(t).$$

1.5 Особенности химического оборудования, как объекта проектирования

1. Большинство агрегатов серийно не выпускаются, являются уникальными, что затрудняет статистических данных о причинах, типах и характере отказов. Поэтому основные методы испытаний на надежность не приемлемы.
2. Агрегаты и оборудование для химических производств состоят из большого количества составных частей, каждая из которых имеет свою функцию работоспособности. Поэтому для них характерно большое количество критериев и причин отказов.
3. Агрегаты ХТС работают при тяжелых режимах функционирования, связанных с агрессивностью сред, высокими температурами и давлениями. В результате в оборудовании возникают интенсивные нагрузки механической, физической и химической природы одновременно.
4. Все оборудование ХТС обладает высокой потенциальной опасностью, что обусловлено комплексом поражающих факторов: отравление и заражение химически опасными веществами, тепловое и изотопное излучение, воздействие взрывных волн.

- Учитывая потенциальную опасность химических производств, требования к надежности химического оборудования, выраженные через численные значения одного или нескольких перечисленных ранее показателей, **должны быть сформулированы уже на первой стадии проектирования оборудования – на стадии составления технического задания.**
- *Разработчик оборудования на стадии технического проекта обязан **оценить уровень надежности** выбранного им варианта конструктивного решения и сравнить полученные оценки с заданными в техническом задании.*
- Существующие методы оценки показателей надежности основаны на анализе и обработке данных трех различных типов.

- **Данные первого типа** представляют собой результаты специально проводимых определительных испытаний изделий на надежность. Как правило, определительным испытаниям подвергаются изделия, выпускаемые серийно.
- **Данные второго типа** основаны на информации, полученной во время эксплуатации самой ХТС, ее составных частей или их аналогов. Эксплуатационные данные особенно ценны для изделий, выпускаемых малыми сериями или в единственном экземпляре. Последнее характерно для химико-технологических аппаратов
- **Третий вид данных**, с помощью которых могут быть рассчитаны показатели надежности сложных ХТС, включает информацию об ее структуре, составных частях и характере взаимосвязи между ними, а также показатели надежности отдельных элементов ХТС.

- Исследование причин потери работоспособности элементов ХТС лежит в основе решения целого ряда задач повышения надежности:
 1. нахождения наиболее уязвимых элементов,
 2. разработки оптимальных схем резервирования оборудования,
 3. определения рационального технического обслуживания,
 4. установления межремонтных периодов,
 5. уточнения правил и норм эксплуатации и т. д.
- Нужно отметить, что причина отказа далеко не всегда очевидна. Порой на ее поиски уходит время сравнимое с временем последующего ремонта. Бывают случаи, когда причину отказа объекта установить и вовсе не удастся.