

Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины,  
Харьков, Украина

**ПРИМЕНЕНИЯ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ  
ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК БЕЗОТКАЗНОСТИ  
НЕВОССТАНАВЛИВАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

*Приведена методология определения гарантийного срока эксплуатации, средней наработки на отказ и максимально возможного срока эксплуатации элементов энергетического оборудования. Рассмотрено влияние эксплуатационных повреждений элементов оборудования на характеристики их безотказности.*

**Ключевые слова:** компьютерное моделирование, вероятность безотказной работы, интенсивность отказов.

В настоящее время существует большое количество энергетических объектов, время эксплуатации которых приближается к проектному ресурсу или превышает его. В связи с этим проблема оценки характеристик безотказности оборудования представляет собой чрезвычайно актуальную задачу по обеспечению высокой надежности, безопасности и экономической эффективности промышленных объектов.

К наиболее важным показателям надежности невосстанавливаемых объектов – показателям безотказности – относятся вероятность безотказной работы (ВБР), интенсивность отказов и средняя наработка до отказа [1].

Наиболее информативной функцией, по виду которой можно судить о работоспособности оборудования, для невосстанавливаемых объектов является функция интенсивности отказов. На практике ее представляют как аддитивную суперпозицию двух функций: функции интенсивности внезапных отказов и функции интенсивности постепенных отказов.

Функция интенсивности внезапных отказов основной вклад вносит на начальных этапах функционирования объектов, функция интенсивности постепенных отказов – на завершающем этапе функционирования, когда в конструкции объекта происходит существенное накопление повреждений (различного вида дефектов), обусловленных старением материалов. Поскольку в практике эксплуатации оборудования стоит задача определения момента, начиная с которого процессы старения приобретают катастрофический характер, в настоящей работе определялась функция интенсивности постепенных отказов.

Как было показано ранее [2], с помощью специального расчетно-экспериментального метода (РЭМ) [3] возможно определить диапазон изменения долговечности (ресурса) практически без испытания элементов конструкций, а лишь на основе испытания образцов. При этом модель одного и того же материала можно задавать различным образом, учитывая, что в

реальных условиях могут быть случаи локализованного сосредоточения "слабых" элементов (т.е. элементов, которым соответствуют минимальные для данного распределения значения предельных деформаций).

Вероятность того или иного расположения структурных элементов с разными предельными характеристиками на мезоуровне естественно будет приводить и к разбросу свойств макрообъекта.

Для конкретного материала элемента оборудования в конкретных условиях эксплуатации всегда можно построить модель материала в РЭМ таким образом, что все «слабые» структурные элементы будут находиться в одном сечении. Число шагов до разрушения при этом будет определять гарантийный срок эксплуатации (назначенный ресурс) этого элемента оборудования в данных условиях нагружения.

Если в процессе эксплуатации возникают дополнительные повреждения, то они вносятся в модель материала с последующим пересчетом, тем самым определяя изменение характеристик безотказности при наличии возникших повреждений. Таким образом, появляется возможность определять максимально возможный срок эксплуатации оборудования по установленному для него значению вероятности безотказной работы.

В зависимости от условий эксплуатации рассмотрены две задачи: оценка характеристик безотказности для нормальных условий эксплуатации и для случаев, когда имелись отклонения от требований к состоянию элементов конструкции (в частности, при наличии коррозионных повреждений). При расчетах использовалось нормальное распределение наработки до отказа, поскольку именно нормальное распределение используется для оценки надежности изделий при наличии постепенных (износных) отказов [1].

В теории надежности за случайную величину обычно принимают время работы изделия (время до возникновения отказа). В этом случае функция плотности распределения  $f(t)$  будет служить полной характеристикой рассеивания сроков службы элементов. Вид этой функции зависит от закономерностей процесса потери элементом работоспособности.

Считается, что если наработка до отказа подчинена нормальному распределению, то плотность распределения отказов описывается выражением

$$f(t) = \frac{1}{S\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{(t-T_0)^2}{2S^2}\right\}, \quad (1)$$

где  $T_0$  и  $S$  – параметры распределения, соответственно, математическое ожидание и среднеквадратичное отклонение, которые определяют среднюю наработку на отказ и дисперсию соответственно.

Графики изменения показателей безотказности при нормальном распределении наработки до отказа приведены на рис. 1.

Левая ветвь кривой распределения  $f(t)$ , относящаяся к области малой вероятности отказов, используется обычно для характеристики безотказности работы изделия, а вся кривая  $f(t)$  и ее параметры необходимы для оценки его долговечности.

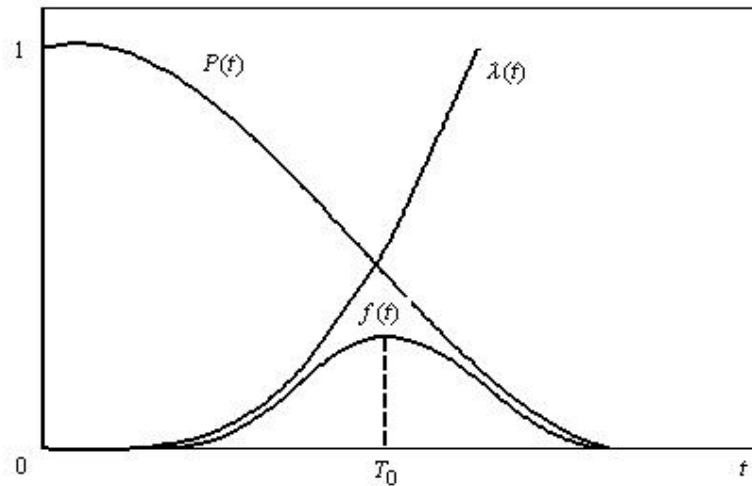


Рис. 1. Зависимости характеристик безотказности для нормального распределения наработки до отказа.

Из графика  $f(t)$  видно, что  $T_0$  является центром симметрии распределения, поскольку при изменении знака разности  $(t - T_0)$  выражение (1) не меняется. При  $t = T_0$  плотность распределения отказов достигает своего максимума.

При этом показатели безотказности объекта определяются как

$$\begin{aligned}
 q(t) &= \Phi\left(\frac{t - T_0}{S}\right), \\
 P(t) &= 1 - q(t), \\
 \lambda(t) &= \frac{f(t)}{P(t)},
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

где  $q(t)$  – вероятность отказа;  $P(t)$  – вероятность безотказной работы;  $\lambda(t)$  – интенсивность отказов.

Формулы (2) использовались в настоящей работе для определения характеристик безотказности паропровода Ду-500.

Для определения параметров нормального распределения наработки до отказа  $T_0$  и  $S$  проводились следующие расчеты с помощью РЭМ.

Модель материала задавалась двумя способами: случайным образом и принудительным расположением «слабых» структурных элементов в одном сечении модели. С учетом модели нагружения (в зависимости от условий эксплуатации) определялось количество шагов до разрушения (до наступления предельного состояния) –  $n_1$  и  $n_2$  соответственно. При этом число шагов до разрушения во втором случае (при локализации «слабых» элементов) принималось за гарантийный ресурс (ресурс, который

обеспечивается с вероятностью, равной единице), а параметры  $T_0$  и  $S$  определялись следующим образом

$$T_0 = \frac{n_1 - n_2}{2},$$
$$S = \frac{T_0 - n_2}{3}.$$

Полученные таким образом значения  $T_0$  и  $S$  подставлялись в формулы (2).

Рассмотрим конкретные примеры применения вышеприведенной методологии.

Проведем оценку характеристик безотказности паропровода Ду-500 за парогенератором энергоблока с ВВЭР-1000.

Для энергоблока АЭС с ВВЭР-1000 технологические параметры теплоносителя при работе на номинальной мощности имеют следующие значения [4]: температура  $-274,3^{\circ}\text{C}$ ; давление  $p = 5,88$  МПа.

Рассмотрим небольшой прямой участок паропровода такой, чтобы изгибными напряжениями можно было бы пренебречь. Геометрические размеры такого участка следующие:

- наружный диаметр  $D = 540$  мм;
- внутренний диаметр  $d = 500$  мм;
- толщина стенки  $h = 20$  мм;
- средний радиус  $r = (R_1 + R_2) / 2 = 260$  мм.

Поскольку отношение  $h / R_1 = 20 / 250 \ll 1$ , паропровод Ду-500 может быть отнесен к тонкостенной трубе.

При номинальном режиме работы энергоблока радиальное напряжение в стенке паропровода определяется по формуле

$$\sigma = \frac{pR_1}{h} = 72,5 \text{ МПа.}$$

По этому значению  $\sigma$  определялся шаг нагружения для модели нагружения РЭМ.

Вначале модель материала задавалась случайным образом. По результатам расчетов с применением РЭМ была получена статистическая выборка – массив наработки до отказа. Выборка характеризует случайную величину наработки до отказа трубопровода для случайного распределения «слабых» структурных элементов в модели материала.

На рис. 2 представлена гистограмма наработки до отказа трубопровода для этого случая ( $\hat{P}_i$  – частота появления отказов). Было установлено, что  $n_1$  находится в диапазоне от 993 до 1056 шагов (соответственно  $n_{\min}$  и  $n_{\max}$ ).

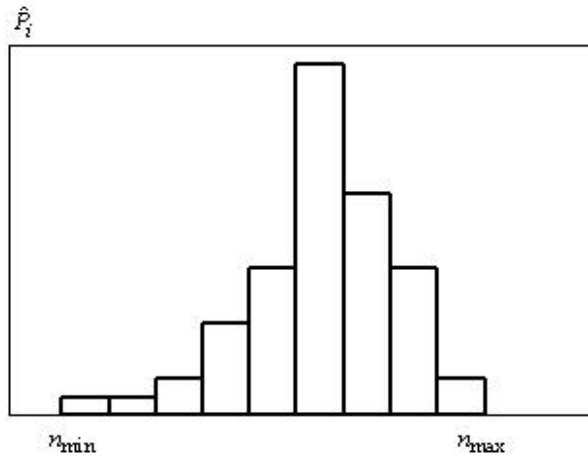


Рис. 2. Типичная гистограмма наработки до отказа трубопровода.

Значение  $n_2$ , необходимое для определения характеристик безотказности паропровода по вышеприведенной методологии, составило 363 шага.

На рис. 3 изображены зависимости ВБР (кривые 1, 2) и интенсивности отказов (кривые 3,4) паропровода, полученные с помощью РЭМ для двух крайних случаев («пессимистического» ( $n_1 = 993$ ) – кривые 2 и 4 и «оптимистического» ( $n_2 = 1056$ ) – кривые 1 и 3).

Как видно из рис. 3, гарантийный ресурс паропровода при этом не изменяется, однако дальнейший ход кривых ВБР заметно отличается, также как и функция интенсивности отказов.

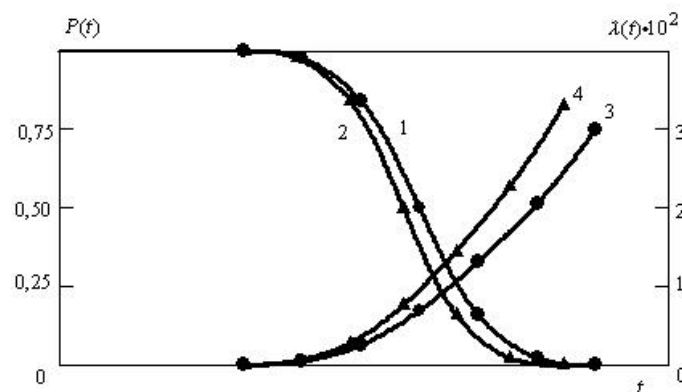


Рис. 3. Зависимости ВБР и интенсивности отказов паропровода.

По зависимости ВБР, приведенной на рис. 3, можно также определить и максимально возможный срок эксплуатации трубопровода. При этом должно быть известно (или задано) предельно допустимое значение вероятности его безотказной работы.

Известно, что начальная прочность объекта в процессе эксплуатации снижается за счет развития деградационных процессов различной физической природы. Значительная часть процессов деградации материала проходит скрытно и поврежденное состояние в большинстве случаев в течение 50-70% общей долговечности не может быть выявлено. При этом неконтролируемые постепенные отказы в результате накопления повреждений в опасных зонах конструктивных элементов создают впечатление внезапных.

В связи с этим в настоящей работе проведена оценка влияния эксплуатационных коррозионных повреждений стенки трубопровода на характеристики его безотказности.

Для этого в рамках компьютерного моделирования на определенном этапе эксплуатации (после определенного числа шагов нагружения) создавались модели материала трубопровода с учетом изменения толщины его стенки.

На рис. 4,а приведены зависимости интенсивности отказов трубопровода для трех случаев (кривая 1 – трубопровод без коррозионных повреждений, кривая 2 – относительное утонение стенки 0,1, кривая 3 – относительное утонение стенки 0,2).

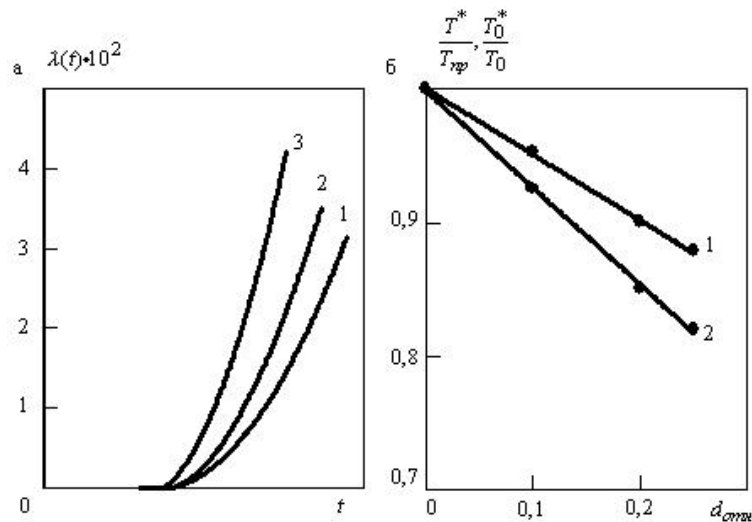


Рис. 4. Изменение характеристик безотказности трубопровода при наличии эксплуатационных коррозионных повреждений.

На рис. 4,б приведено относительное изменение гарантийного ресурса  $\frac{T^*}{T_{np}}$  ( $T^*$  – гарантийный ресурс при наличии коррозионных повреждений,  $T_{np}$  – проектный ресурс) – прямая 1 и относительное изменение среднего срока службы  $\frac{T_0^*}{T_0}$  ( $T_0^*$  – средний срок службы трубопровода при наличии

коррозии,  $T_0$  – проектный средний срок службы) – прямая 2 в зависимости от глубины коррозии ( $d_{отн}$ ).

Видно, что возникновение на выбранном этапе эксплуатации трубопровода коррозионных повреждений его стенки оказывает существенное влияние как на функцию интенсивности отказов, так и на изменение таких характеристик как гарантийный ресурс и средний срок службы.

Безопасная эксплуатация объектов ответственного назначения требует проведения постоянного мониторинга его технического состояния во время назначенного срока эксплуатации, поскольку предусмотреть все реальные условия при проектировании, которые влияют на ресурс, невозможно. Поэтому естественно, что точность прогноза будет увеличиваться по мере увеличения объема фактических данных об эксплуатируемом объекте.

### Summary

The methodology of computer modelling for definition of a warranty assurance, mean lifes to failure and the greatest possible term of operation of the power equipment elements is considered. Influence of operational damages of the equipment elements on their non-failure operation characteristics is considered.

**Keywords:** computer modelling, probability of survival, failure rate.

### Резюме

Наведено методологію визначення гарантійного строку експлуатації, середнього напрацювання на відмову і максимально можливого строку експлуатації елементів енергетичного обладнання. Розглянуто вплив експлуатаційних пошкоджень елементів обладнання на характеристики їх безвідмовності.

**Ключові слова:** комп'ютерне моделювання, ймовірність безвідмовної роботи, інтенсивність відмов.

1. *Половко А. М., Гуров С. В.* Основы теории надежности. – СПб.: БХВ-Петербург, 2008. – 704 с.
2. *Милешкин М. Б., Библик И. В.* Исследование влияния статистического распределения механических свойств структурных элементов материала на конструкционную прочность и ресурс // Надежность и долговечность машин и сооружений. – 2004. – № 2. – С. 75 – 80.
3. *Милешкин М. Б., Библик И. В.* Новый метод исследования особенностей механического поведения материалов и оценки прочностной надежности элементов конструкций // Надежность и долговечность машин и сооружений. – 2006. – Вып. 26. – С. 302 – 310.
4. *Острейковский В. А.* Старение и прогнозирование ресурса оборудования атомных станций. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 288 с.

Поступила 23.05.2009