

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

ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ ОБОРУДОВАНИЯ АЭС НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ СТЕПЕНИ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ ПОВРЕЖДЕННОСТИ

В рамках специального расчетно-экспериментального метода рассматривается возможность применения компьютерного моделирования для оценки вероятности безотказной работы по модели „нагрузка – несущая способность”. Показано, что с помощью компьютерного моделирования возможно построение функции «усталости» с учетом эксплуатационных повреждений.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, модель «нагрузка – несущая способность», функция «усталости».

В настоящее время большое внимание уделяется вопросам анализа надежности оборудования с учетом старения, на основании которого можно делать выводы о продлении срока его эксплуатации. Особенно актуальна данная проблема в ядерно-энергетической отрасли.

Оценка ресурса и его продление являются важными проблемами для безопасного функционирования энергетического оборудования. Совершенствование методов расчетной оценки показателей безопасности ответственных объектов в большой степени связано с применением моделей, которые включают описание процессов, приводящих к возникновению опасных отказов.

Значительную часть задач о прогнозировании показателей надежности конструкций можно сформулировать на основе моделей «нагрузка – несущая способность» [1]. Методы расчета надежности с использованием этих моделей могут быть использованы для широкого класса элементов тепломеханического оборудования (сосуды давления, трубопроводы и т.д.).

Для определения характеристик надежности объектов по модели «нагрузка – несущая способность» предполагается, что нагрузка S представляется стационарным случайным процессом, а несущая способность R – нестационарным случайным процессом с монотонно убывающим математическим ожиданием [1]

$$m_S(t) = m_{S0}, \quad \sigma_S(t) = \sigma_{S0}, \quad A_S = \sigma_{S0} / m_{S0}, \quad (1)$$

$$\begin{aligned} R(t) &= R_0 \cdot \varphi(t), \quad m_R(t) = m_{R0} \cdot \varphi(t), \\ \sigma_R(t) &= \sigma_{R0} \cdot \varphi(t), \quad A_R = \sigma_{R0} / m_{R0}, \end{aligned} \quad (2)$$

где R_0, S_0 – случайные величины несущей способности и нагрузки в начальный момент времени t_0 ; m – математическое ожидание; σ – среднеквадратическое отклонение; $\varphi(t)$ – функция «усталости».

Случайные величины $S(t)$ и $R(t)$ распределены по нормальному закону распределения, наиболее распространенному при расчетах надежности с использованием модели «нагрузка – несущая способность».

Вид функции «усталости» $\varphi(t)$ зависит от характера процессов старения, протекающих в материале конструкции под действием эксплуатационных нагрузок (коррозия, эрозия, усталость и др.). Старение может проявляться по-разному в зависимости от конкретного объекта. В принципе, все компоненты АЭС подвержены изменению свойств материалов в процессе эксплуатации, что приводит к снижению функциональных возможностей. Функция «усталости» фактически определяет время безотказной работы объекта.

Для оценки влияния старения на долговечность, безопасность и экономическую эффективность оборудования в рамках модели «нагрузка – несущая способность» необходимо решать задачу нахождения аналитического вида функции «усталости», поскольку знание вида и параметров функции «усталости» позволяет с большой достоверностью определять ресурс оборудования. Функция «усталости» является непрерывной монотонно убывающей функцией, при этом $\varphi(t=0) = 1$ и $\lim_{t \rightarrow \infty} \varphi(t) = 0$.

Обычно функция «усталости» задается в виде простых функций (например, экспоненциальной [1]), а не по данным эксплуатационного контроля при оценке фактического состояния материала элемента конструкции.

При такой модели надёжности объекта вероятность безотказной его работы за время t выражается формулой [1]

$$P(t) = \frac{1}{2} + \Phi \left[\frac{\eta(t) - 1}{\sqrt{A_R^2 \eta^2(t) + A_S^2}} \right], \quad (3)$$

где $\eta(t)$ — функция изменения коэффициента запаса во времени

$$\eta(t) = \frac{m_R(t)}{m_S(t)} = \frac{m_{R0}}{m_{S0}} \varphi(t) = \eta_0 \varphi(t), \quad (4)$$

A_R, A_S – коэффициенты вариации несущей способности и нагрузки;

$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-x^2/2} dx$ – функция Лапласа.

Вероятность отказа за время t определяется как

$$q(t) = 1 - P(t). \quad (5)$$

В настоящей работе проведена оценка возможности использования компьютерного моделирования в рамках специального расчетно-экспериментального метода (РЭМ) [2] для определения функции «усталости» с последующей оценкой вероятности безотказной работы (ВБР) по модели «нагрузка – несущая способность».

В качестве исходных данных для расчета ВБР $P(t)$ объекта по формуле (3) используются результаты прочностных расчетов объекта; характеристики случайных процессов $S(t)$ и $R(t)$; функция "усталости" $\varphi(t)$, получаемая в результате статистического моделирования процесса разрушения материала; таблица значений функции Лапласа.

Эксплуатация конструкции по ее фактическому состоянию возможна при решении двух основных проблем: надежной оценки текущей поврежденности физическими методами контроля состояния материала и прогноза развития текущей поврежденности на базе различных прогнозных моделей развития деградационных процессов в конструктивных элементах.

Как было показано ранее [3, 4], РЭМ позволяет моделировать «промежуточную поврежденность» и оценивать ее влияние на прочностную надежность при усталостном и длительном статическом нагружении при наличии данных о фактическом состоянии материала оборудования, бывшего в эксплуатации. Для построения функции «усталости», представляющей собой изменение степени поврежденности материала элемента конструкции при его эксплуатации, необходимы сведения о режимах нагружения элемента конструкции, а также о времени проведения контроля для оценки фактического состояния материала.

Сведения о фактическом состоянии материала должны включать конкретные параметры, в частности:

- толщину стенки элемента конструкции, когда доминирующим механизмом старения является эрозионно-коррозионный износ;
- число циклов нагружения, когда доминирующим механизмом старения является накопление усталостных повреждений;
- характеристики дефектов, когда доминирующими механизмами старения являются растрескивание металла и рост трещин.

В качестве примера рассмотрены результаты построения функции «усталости» и оценки ВБР прямых участков и гибов трубопроводов энергоблоков АЭС для двух доминирующих механизмов старения – эрозионно-коррозионного износа и усталости.

Вначале рассмотрим прямой участок трубопровода главного циркуляционного контура Ду-500 ВВЭР-440, выполненного из стали 08X18H12T, при трех основных режимах эксплуатации: нормальные условия эксплуатации (НУЭ), гидроопрессовка (ГО) 1 раз в 4 года и гидроиспытания (ГИ) 1 раз в год [1].

Значения математического ожидания нагрузки от внутреннего давления в трубопроводе составляли: для НУЭ – 114 МПа, для ГО – 130 МПа и для ГИ – 179 МПа. Изменение несущей способности трубопровода в процессе эксплуатации за 30 лет происходит с начального значения 377 МПа до 309 МПа [1].

Механические свойства материала трубопровода для трех указанных режимов, которые использовались в расчетах с помощью РЭМ, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Механические свойства стали 08X18H12T

Режим	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_b , МПа	$E \cdot 10^{-4}$, МПа	δ , %	T , °C
НУЭ	172	377	18	40	300
ГИ	186	436	19,7	40	130
ГО	186	436	19,7	40	130

На рис. 1 приведены функции «усталости» для двух режимов эксплуатации трубопровода: кривая 1 – НУЭ, кривая 2 – НУЭ+ГИ+ГО. Во втором случае модель нагружения РЭМ предполагала на фоне НУЭ подгружение до уровня нагрузок ГИ 1 раз в год и ГО 1 раз в четыре года. Привязка ко времени осуществлялась следующим образом. Вначале определялась функция «усталости» для НУЭ. При этом определялось изменение коэффициента запаса во времени.

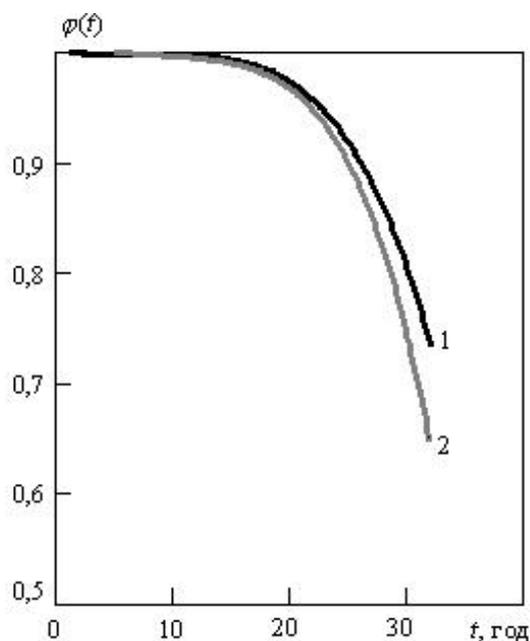


Рис. 1. Функции «усталости» для двух режимов эксплуатации трубопровода.

Так как за 30 лет коэффициент запаса изменился от значения $\eta_0 = \frac{377}{114} = 3,31$ до $\eta(30) = \frac{309}{114} = 2,71$, то подставляя функцию «усталости» в уравнение (4) можем определить количество шагов нагружения при использовании РЭМ, которому соответствует значение коэффициента запаса 2,71. После этого приравниваем это количество шагов нагружения к 30 годам эксплуатации трубопровода, определяем число шагов, соответствующее одному году и четырем годам соответственно, и через это число шагов производим компьютерное подгружение модели материала, соответствующее ГИ и ГО.

Полученные функции «усталости» аппроксимировались многочленами четвертой степени, что дало возможность определять значения $\varphi(t)$ при произвольно выбранном t .

ВБР трубопровода определялась по формуле (3).

Значения коэффициентов вариации нагрузки (A_S) и несущей способности (A_R), определяемые как отношение соответствующих среднеквадратических отклонений к математическим ожиданиям, обычно находятся в диапазоне 0,01 – 0,4 [1]. Коэффициент вариации нагрузки определяется из условий эксплуатации. Для определения вида распределения и коэффициента вариации несущей способности трубопровода при НУЭ был применен РЭМ. В данном случае под несущей способностью подразумевалось число шагов до разрушения. Распределение было получено при многократном повторении расчета с различным случайным распределением предельных свойств мезообъемов в модели материала РЭМ. В результате оказалось, что распределение несущей способности трубопровода как случайной величины близко к нормальному, а коэффициент вариации A_R для расчетов ВБР по формуле (3) может быть принят равным 0,03.

Результаты расчетов ВБР трубопровода для двух режимов эксплуатации приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты расчетов ВБР в зависимости от длительности прогноза

Длительность прогноза, год	НУЭ		НУЭ+ГИ+ГО	
	Значение аргумента функции Лапласа, x	ВБР	Значение аргумента функции Лапласа, x	ВБР
10	6,68	0,999999999	6,67	0,999999999
20	6,58	0,999999999	6,56	0,999999999
30	5,88	0,9999999	5,54	0,9999997
35	4,32	0,99997	3,10	0,99903
36	3,67	0,99989	1,99	0,9767

Рассмотрим возможность применения РЭМ для оценки ВБР гйба трубопровода питательной воды. Наиболее нагруженным участком трубопровода питательной воды является второй от барабан-сепаратора гйб [5], доминирующим механизмом старения которого является эрозионно-коррозионный износ. Контролируемым эффектом проявления эрозионно-коррозионного износа является утонение стенки гйба трубопровода.

Материал гйба – сталь 20, рабочее давление 7 МПа, температура 170°C. Механические свойства стали 20 при рабочей температуре: $\sigma_{0,2} = 250$ МПа, $\sigma_b = 420$ МПа, $E = 205000$ МПа, $\delta = 25$ %. Толщина стенки гйба трубопровода 21,6 мм. За 30 лет утонение стенки гйба трубопровода составило 2,4 мм, допускаемая толщина гйба, соответствующая 45 годам эксплуатации – 18,0 мм [5].

Расчет проводился следующим образом. Вначале определялось число шагов до разрушения модели материала гйба для исходного состояния. Затем для толщины стенки 19,2 мм (21,6 мм – 2,4 мм), соответствующей 30 годам эксплуатации, определялся новый шаг нагружения, в модель материала вносились коррозионные повреждения и определялось число шагов до разрушения при наличии коррозии. Аналогичные расчеты были проведены и для толщины гйба 18,0 мм. По этим данным была построена функция «усталости» гйба трубопровода, приведенная на рис. 2.

Полученная функция «усталости» хорошо аппроксимируется прямой $\varphi(t) = 1 - 0,00703t$.

Вероятность отказа гйба трубопровода вычислялась по формуле (5).

Функция вероятности отказа гйба трубопровода от коррозионных повреждений приведена на рис. 3.

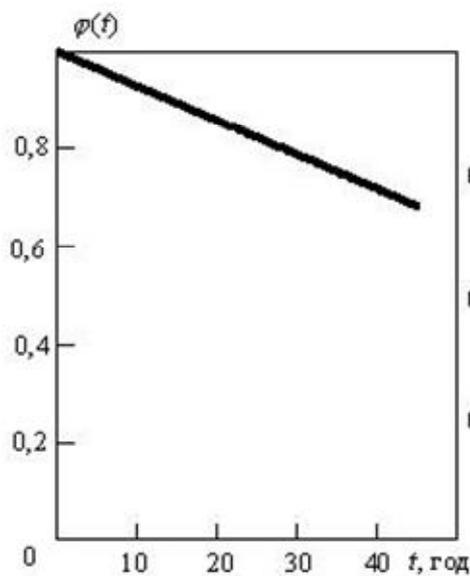


Рис. 2. Функция «усталости» гйба трубопровода.

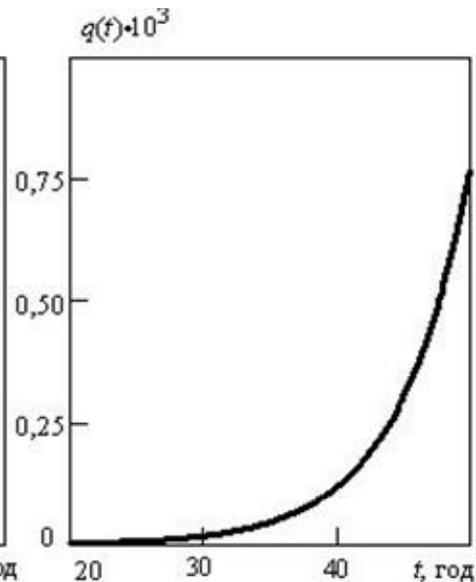


Рис. 3. Функция вероятности отказа гйба трубопровода.

Естественно, что для уточнения закона изменения скорости утонения гниба трубопровода (уточнения функции «усталости») на последующий период эксплуатации, необходимо по истечении определенного периода эксплуатации провести дополнительный контроль толщины стенки с целью обоснования возможности дальнейшей эксплуатации трубопровода без снижения рабочих параметров.

Применение модели «нагрузка – несущая способность» дает возможность определить ВБР объекта через коэффициент запаса, коэффициенты вариации «нагрузки» и «несущей способности» и через свойства материала конструкции, подверженного разрушению под влиянием нагрузки.

Очевидно, что данные о фактическом состоянии материала оборудования в процессе эксплуатации будут служить дополнительной информацией для определения функции «усталости», внося необходимую корректировку в расчеты с применением компьютерного моделирования.

Опыт эксплуатации трубопроводов может быть использован и при рассмотрении потенциальных отказов трубопроводов посредством идентификации характерных механизмов деградации, либо их комбинаций, а также эксплуатационных параметров и условий. Исходя из анализа данных, полученных при эксплуатации трубопроводов (с учетом данных эксплуатационного контроля), можно, создав соответствующую базу данных по функциям «усталости», проводить оценку надежности оборудования с учетом старения, на основании которой можно делать выводы о возможности продления срока его эксплуатации.

Summary

The possibility of computer modelling application is considered within the framework of a special design-experiment method for the estimation of the probability of survival by the model «load – bearing strength». It is shown, that with the help of a computer modelling it is possible to draw the function of fatigue taking into account the operational damages.

Keywords: computer modelling, model «load – bearing strength», function of fatigue.

Резюме

В рамках спеціального розрахунково-експериментального методу розглядається можливість застосування комп'ютерного моделювання для оцінки ймовірності безвідмовної роботи за моделлю „навантаження – несуча здатність”. Показано, що з допомогою комп'ютерного моделювання можлива побудова функції «втоми» з урахуванням експлуатаційних пошкоджень.

Ключові слова: комп'ютерне моделювання, модель «навантаження – несуча здатність», функція «втоми».

1. *Острейковский В. А.* Старение и прогнозирование ресурса оборудования атомных станций. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 288 с.
2. *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.
3. *Милешкин М. Б., Библик И. В.* Применение специального расчетно-экспериментального метода для оценки остаточного ресурса элементов конструкций по фактическому состоянию материала // Надежность и долговечность машин и сооружений. – 2006. – Вып. 27. – С. 304 – 310.
4. *Милешкин М. Б., Библик И. В.* Применение компьютерного моделирования для прогнозирования длительной прочности лопаточных жаропрочных сплавов // Вестник двигателестроения. – 2008. – С. 111 – 115.
5. *Методика* оценки технического состояния и остаточного ресурса трубопроводов энергоблоков АЭС. – М.: ГП Концерн «Росэнергоатом», 1999. – 64 с.

Поступила 23.05.2009