

О ПРОГНОЗИРОВАНИИ РЕСУРСА АКТИВНЫХ ЗОН ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ НА СТАДИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Куликов И.С.

В современной технике понятие предельного состояния, соответствующего исчерпанию ресурса элемента или всей конструкции в целом рассматривается по-разному. Это может быть снижение показателей безопасности, экономическая нецелесообразность эксплуатации объекта, несоответствие шагнувшей вперед технологии (моральный износ) и т.д.

Ресурс и срок службы, характеризующие долговечность, являются основными понятиями теории надежности. В простейших случаях, когда объект эксплуатируют до первого отказа, тождественного предельному состоянию, безотказность работы объекта одновременно является критерием его долговечности. В реальности мы чаще сталкиваемся с более общим случаем, когда после определенного периода работы конструкции интенсивность отказов снижена до минимума, а система технического обслуживания гарантирует предупреждение возможных отказов. В таком случае основными понятиями становятся предельное состояние и ресурс.

Более подробные сведения об этом можно найти в монографии [1].

Рассмотрим данную проблему применительно к ресурсу активных зон ядерных реакторов по признаку радиационной безопасности.

Предположим, что в процессе эксплуатации ядерного реактора в оболочках тепловыделяющих элементов (ТВЭЛОВ) накапливаются повреждения (мгновенные пластические деформации, деформации тепловой и радиационной ползучести, усталостного повреждения, коррозия и т.д.). Практика показывает, что отказ одного или нескольких ТВЭЛОВ не приводит к отказу всей тепловыделяющей сборки, а тем более активной зоны в целом при нормальной работе реактора. Допустимо также предположение о том, что разгерметизация оболочки одного ТВЭЛА не влияет на условия работы других ТВЭЛОВ в смысле их механической целостности. Будем считать, что дальнейшая эксплуатация реактора (по условиям радиационной безопасности и здоровья обслуживающего персонала) становится невозможной только тогда, когда число разгерметизированных ТВЭЛОВ достигнет некоторого критического значения N_k .

Пусть по результатам дореакторных и внутриреакторных испытаний ТВЭЛОВ на долговечность получены данные об их эксплуатационной надежности. Обозначим полученную на основании этих испытаний априорную вероятность безотказной работы ТВЭЛА $P_o(t)$, общее число ТВЭЛОВ в активной зоне – N , число отказавших ТВЭЛОВ n .

Вероятность того, что к моменту времени t среди N ТВЭЛОВ разгерметизируется не более n определим приближенно по схеме Бернулли

$$P_N^n = \sum_{k=0}^n C_N^k [1 - P_o(t)]^k P_o(t)^{N-k} \quad (1)$$

где C_N^k - биномиальные коэффициенты $\left(C_N^k = \frac{N!}{k!(N-k)!} \right)$.

Учитывая, что число N достаточно велико, а число n – не слишком мало, распределение разгерметизированных твэлов с достаточной точностью будет соответствовать нормальному закону.

Обозначим плотность вероятности через $P(n, t)$, $n(t)$ – вычисляется по эмпирической зависимости. Тогда

$$P(n, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi D[n(t)]}} \exp\left\{-\frac{n - E[n(t)]}{2D[n(t)]}\right\} \quad (2)$$

где $E[n(t)]$ - математическое ожидание,

$D[n(t)]$ - дисперсия:

$$\begin{aligned} E[n(t)] &= N[1 - P_0(t)] \\ D[n(t)] &= N[1 - P_0(t)]P_0(t) \end{aligned} \quad (3)$$

Вероятность нормальной работы активной зоны определим как вероятность случайного процесса.

$$R(t) = P\{n(t) < N_k\} \quad (4)$$

Используя нормальное распределение плотности вероятности (2) для значений процесса $n(t)$, найдем приближенно

$$R(t) = \Phi\left\{\frac{N_k - N[1 - P_0(t)]}{\sqrt{NP_0(t)[1 - P_0(t)]}}\right\} \quad (5)$$

Где $\Phi(x)$ – нормированная функция распределения Гаусса

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{Z^2}{2}\right) dZ \quad (6)$$

Из соотношения (5) следует, что функция распределения ресурса активной зоны $F(t)$ будет иметь вид

$$F(t) = 1 - R(t) \quad (7)$$

Учитывая данные по вероятности выхода из строя твэлов [2], можно принять с некоторым запасом в первом приближении вероятность нормальной работы каждого твэла.

$$P_0(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{t_k}\right)^v\right] \quad (8)$$

Тогда получим вероятность разгерметизации твэла

$$P_p(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{t_k}\right)^v\right] \quad (9)$$

где t_k - время кампании реактора,

v – определяется на основе дореакторных и внутриреакторных испытаний.

На основе имеющихся эксплуатационных данных для быстрых реакторов типа БН v можно принять равным 6,5.

Результаты расчетов вероятности разгерметизации твэла для v , равным 6,5 представлены на рис. 1.

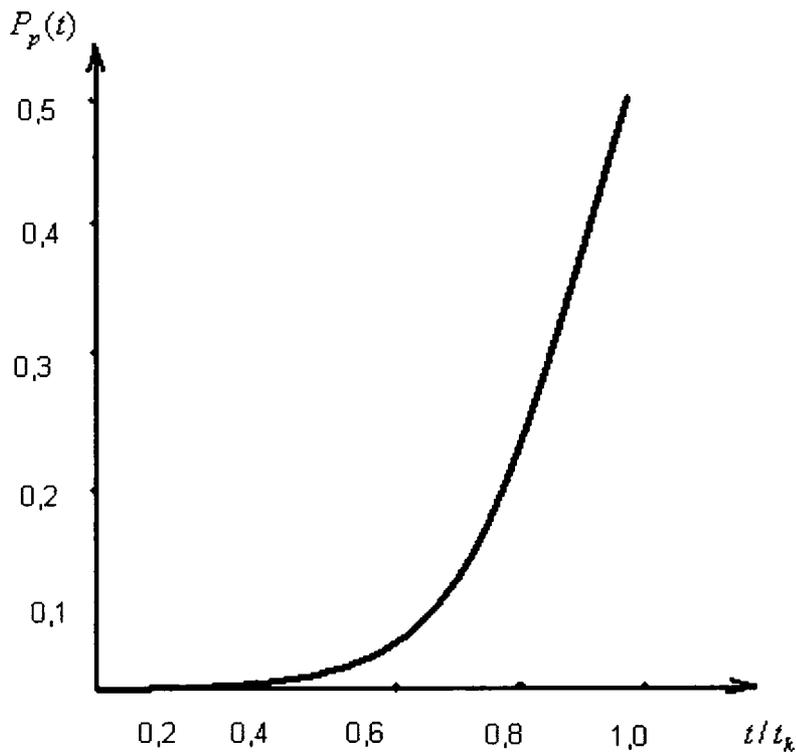


Рис. 1. Вероятность разгерметизации одного твэла с течением времени.

Такой подход является весьма упрощенным, однако эти данные могут быть использованы при построении функции $R(t)$.

Рассмотрим более общий случай, предполагая, что выход из строя одного или нескольких твэлов увеличивает нагрузку на другие элементы.

Введем меру повреждения $\omega(t)$. В качестве повреждения элемента можно рассматривать накопленные материалом оболочки твэла остаточные механические деформации (мгновенные пластические деформации ползучести, усталостные и коррозионные повреждения). Изменение меры повреждения происходит таким образом, что $\omega = 0$ в начальный момент ($t = 0$), а при разгерметизации твэла $\omega = 1$.

Предположим, что мера повреждения удовлетворяет дифференциальному уравнению

$$\frac{d\omega}{dt} = f[x(t), n(t), \varphi] \quad (10)$$

где $x(t)$ - случайный процесс нагружения; $n(t)$ - число тепловыделяющих элементов, разгерметизированных к моменту времени t , φ - случайная величина, характеризующая свойства элемента.

Тогда вероятность безотказной работы твэла определим как вероятность случайного события, состоящего в том, что в момент времени t будет выполнено неравенство

$$\int_0^t f[x(t'), n(t'), \varphi] dt' < 1 \quad (11)$$

Учитывая большое количество твэлов в активной зоне ядерного реактора, можно принять, что изменчивость случайного процесса $n(t)$ достаточно мала по сравнению с изменчивостью случайной величины φ . Тогда можно записать

$$P_0(t) = P \left\{ \int_0^t f[x(t'), NP_0(t'), \varphi] dt' < 1 \right\} \quad (12)$$

Таким образом, в данном случае мы имеем интегральное уравнение относительно вероятности нормальной работы твэла $P_0(t)$ в предположении, что функция распределения случайной величины φ известна.

ЛИТЕРАТУРА

1. Болотин В.В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций. М.: Машиностроение, 1984. – 312с.
2. Лихачев Ю.И. и др. Оценка вероятности разгерметизации оболочки стержневого твэла, имеющей начальные трещины. Препринт ФЭИ – 900, 1979.– 21с.