

ВЕРОЯТНОСТНОЕ ОЦЕНИВАНИЕ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ЭЛЕМЕНТОВ КОНТУРА ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ РЕАКТОРА ВВЭР ПРИ УПРАВЛЕНИИ СТАРЕНИЕМ

О.М. Гулина, А.В. Меркун, В.П. Семишкин

АО ОКБ «Гидропресс»

142103, г. Подольск, ул. Орджоникидзе, д.21

Р

Основными процессами, ограничивающими ресурс элементов контура теплоносителя реактора (КТР), являются усталость (много- и малоцикловая), различные виды охрупчивания материалов, а также усталостный рост трещин. Эти процессы могут интенсифицироваться влиянием коррозионного воздействия. Важным для принятия решений по эксплуатации КТР является остаточный ресурс – время до достижения предельного состояния, на основании которого выполняется управление ресурсом (старением). Оценка остаточного ресурса осуществляется на основании математических моделей процессов старения как аналитических, так и имитационных, в том виде, который возможен на основании имеющегося опыта эксплуатации и данных контроля. Методы получения оценок остаточного ресурса при различных описаниях процессов старения относятся к задаче пересечения уровня либо наблюдаемым процессом, либо процессом накопления повреждений, либо процессом роста усталостной трещины. Традиционный детерминистический консервативный расчет при этом может быть дополнен получением вероятностной оценки ресурса при наличии информации в виде данных эксплуатационного контроля, а также учетом неопределенностей, связанных с характеристиками металла, качеством средств контроля, способом математического описания режимов работы установки и т.д. Рассматриваются вопросы получения вероятностных оценок ресурса как показателя надежности для некоторых моделей процессов старения в задаче управления ресурсом. Идея относится к способам построения временного ряда с помощью точек контроля и получения оценок ресурса с соответствующими доверительными интервалами.

Ключевые слова: управление ресурсом, процессы старения, остаточный ресурс, суммирование повреждений, интенсивность отказов.

ВВЕДЕНИЕ

Для анализа работоспособности любой системы необходимо построить модель ее функционирования. Модели процессов старения оборудования содержат в качестве параметров показатели эксплуатации, геометрические и физические характеристики материала, получаемые путем прямых измерений, в результате специальных экспериментов, расчетным путем. Большинство полученных таким образом моделей имеет детерминированный характер, поскольку зависимости строятся по усредненным данным. Для

© *О.М. Гулина, А.В. Меркун, В.П. Семишкин, 2022*

обеспечения консервативности эти детерминированные модели применяют при самом неблагоприятном сочетании нагрузок и механических свойств. Тем не менее, объективная недетерминированность параметров и связанных с ними выходных характеристик модели, описывающей процесс старения (или повреждения), приводят к необходимости использования для их описания методов теории вероятностей, случайных процессов и математической статистики. Востребованность именно вероятностных оценок обусловлена, например, использованием показателей надежности при вероятностном анализе безопасности, при реализации риск-ориентированного подхода, а также в задаче оценки остаточного ресурса (g-процентный ресурс) [1, 2].

Таким образом, для оценки ресурсных характеристик элемента необходимо разработать

– модель наблюдаемого или расчетного процесса, определяющего его ресурс;

– модель оценки ресурсных характеристик;

– алгоритм и программную реализацию метода для обработки определенных объемов статистических данных.

По полученному значению остаточного ресурса можно дать рекомендации по выбору мероприятия при управлении ресурсом, в частности, по техническому обслуживанию, ремонту или замене рассматриваемого элемента.

В данном контексте под остаточным ресурсом подразумевается продолжительность эксплуатации объекта от момента последнего контроля до перехода объекта в предельное состояние. Значение остаточного ресурса зависит не только от того, какая доля назначенного ресурса уже выработана, но и в существенной степени от того, насколько сильно изменятся условия эксплуатации в прогнозируемый период [3]. Однако изменение условий эксплуатации, проведение профилактик и т.д. приводят к изменению характера процесса. Поэтому модель должна адекватно отражать такого рода изменения в процессе эксплуатации. В этом случае оценку остаточного ресурса разумно искать, например, на основе принципа Н.М. Седакина [4].

Достаточно часто оценка ресурсных характеристик оборудования осуществляется на основании результатов измерений некоторого наблюдаемого параметра. Прогноз производится на базе анализа поведения функции, аппроксимирующей результаты наблюдений. Это так называемая модель «параметр – поле допуска». Расширением этой модели является модель «нагрузка – несущая способность», где уже два процесса определяют ресурс [2]. Существуют достаточно хорошие методы построения соответствующих регрессий и необходимых доверительных интервалов.

Цель работы – показать источники неопределенности при оценке технического состояния элементов трубопроводов и варианты использования различных статистических процедур для описания их работоспособности. Используемые процедуры служат решению задач оценки частот исходных событий с учетом неопределенностей и оценки остаточного ресурса как для планирования профилактических мероприятий, так и для оптимизации объемов контроля в ППР.

КОНЦЕПЦИЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА

Остаточный ресурс элемент может иметь не только до исчерпания расчетного срока службы, но и после. Это обусловлено действующими нормами и правилами расчета сроков службы оборудования, предусматривающими обеспечение прочности и износостойкости элементов при наиболее неблагоприятных режимах нагружения в заданных условиях эксплуатации, а также при минимальных уровнях механических характеристик конструкционных материалов, обеспечиваемых по требованиям государственных стандартов. Фактические режимы нагружения при соблюдении правил эксплуатации оказываются, как правило, менее напряженными, чем расчетные, что снижает интенсивность расходования заложенных запасов и обеспечивает резерв по остаточному ресурсу обо-

рудования [5].

Поэтому оценка остаточного ресурса позволяет не только контролировать интенсивность процессов старения в элементе (косвенная оценка качества управления ресурсом), но и потенциально выбирать профилактические мероприятия по критерию их эффективности (лучше те, после которых остаточный ресурс больше). Экономический аспект при этом также имеет существенное значение [6].

Источниками стохастичности при описании процессов старения являются

- изменение параметров среды в определенных пределах в процессе эксплуатации;
- изменение концентраций примесей в воде теплоносителя в течение эксплуатации;
- неоднородность свойств металла оборудования (получены из экспериментов);
- ряд неопределенностей, связанных с процессом изготовления (геометрия, дефекты и т.д.);
- случайный в некотором смысле характер действующих нагрузок (например, по амплитуде, по времени приложения и т.д.);
- ненадежность методов контроля, например, вероятность обнаружения дефекта;
- недостоверность результатов контроля, связанная с отсутствием входного (доэксплуатационного) контроля, и др. факторы.

Использование вероятностных моделей вместо детерминированных необходимо, когда эксперименты показывают значительный разброс результатов, например, вариации свойств материалов, изменения условий среды и т.д.

Как правило, в условиях ограниченных данных, например, по редким отказам, оценка показателей надежности (интенсивности отказов, частоты отказов) применяется без оценки погрешности, т.е. без построения доверительного интервала. В этом случае остаточный ресурс будет излишне оптимистичным, что повышает риск эксплуатации. Поэтому методы надежности, которые рассматривают физическую суть старения исследуемых компонентов, используют прогнозные модели (функции отклика) в вероятностной постановке.

ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА НА ОСНОВЕ СУММИРОВАНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ

Оценка остаточного ресурса незаменимых элементов выполняется на основе наблюдаемого или расчетного параметра или группы параметров.

Например, циклическая прочность (усталость) определяет во многом ресурс большинства компонентов КТР РУ. Расчёты циклического повреждения выполняются на основании анализа размахов приведенных механических и температурных напряжений в контрольных точках компонентов. Если приращение повреждения не зависит от накопленного повреждения, применяется принцип линейного суммирования, иначе – нелинейного.

Управление ресурсом (старением) систем элементов КТР осуществляется с целью сохранения и выполнения функций безопасности. КТР включает в себя следующие основные пассивные элементы: корпус реактора, крышку, чехол привода СУЗ ШЭМ-3, корпус парогенератора, коллектор теплоносителя, теплообменные трубы (ТОТ), корпус насоса ГЦНА, корпус КД, корпус СА03, ГЦД, трубопроводы систем КД и СА03. Отказом (или предельным состоянием) элементов КТР считается нарушение целостности (разгерметизация), в результате которого образуется течь теплоносителя из первого контура, что является исходным событием аварии. При управлении ресурсом (старением) КТР учитываются процессы физического старения (температурное старение, радиационное охрупчивание), механические повреждения (усталость, прогрессивное изменение формы, усталостный рост трещины), смешанные механизмы (общая и локальная коррозия, коррозионное растрескивание под напряжением, коррозионный статический и циклический рост трещины) [7].

При расчете на циклическую прочность [8] расчетные кривые усталости получены с учетом максимальных коэффициентов запаса, чтобы исключить риск при детерминированном расчете. Однако этот расчет может оказаться неоправданно консервативным. Альтернативой может служить использование статистических данных испытаний, по которым можно оценить и среднее, и доверительный интервал – это позволяет получить вероятностную оценку технического состояния в рассматриваемый момент и оценку остаточного ресурса при предполагаемых условиях эксплуатации.

Принцип суммирования также используется, если в течение эксплуатации можно выделить периоды времени с квазистационарными условиями, например, по содержанию активаторов коррозии. Тогда каждый из периодов вносит свое значение повреждения (рис. 1) [3, 6]. Здесь ступенчатая функция описывает процесс накопления повреждений (среднее значение).

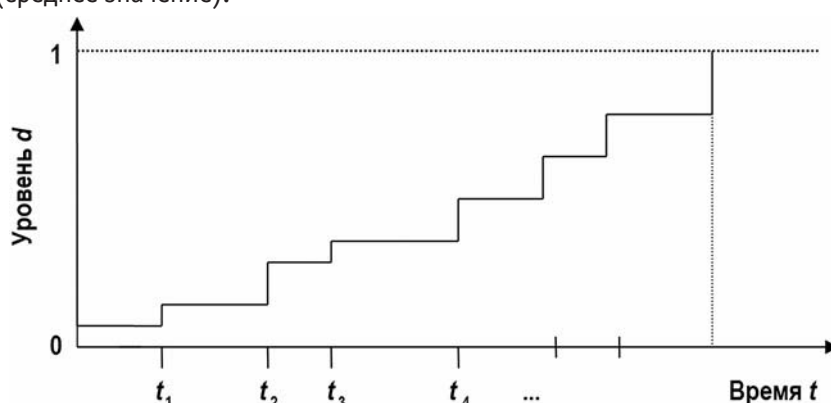


Рис. 1. Процесс накопления повреждений

Известно, что относительный возраст металла (т.е. накопленные квазистатические повреждения от длительного воздействия медленно меняющихся напряжений, температуры и коррозионной среды) можно определить как сумму отношений продолжительностей работы оборудования t_i в известных условиях к рассчитанному максимальному времени τ_i наработки до отказа этого оборудования в аналогичных условиях [3, 6, 9]:

$$\omega_i = \frac{t_i}{\tau_i}; \quad \omega(t) = \sum_{i=1}^n \omega_i,$$

где каждое отдельное повреждение ω_i соответствует работе оборудования в течение некоторого времени t_i с известными эксплуатационными параметрами, от которых зависит время до разрушения τ_i ; $\omega(t)$ – относительный возраст металла, обусловленный работой на нескольких режимах (n – количество режимов к моменту времени t). Именно функция τ_i , зависящая в общем случае от случайных параметров, определяет распределение ω_i .

Тогда вероятность безотказной работы (ВБР) можно определить как вероятность невыхода $\omega(t)$ за уровень $d = 1$ (см. рис. 1), т.е.

$$\omega(0) = 0, \quad \omega(\tau) = 1.$$

Имея вычисленную меру повреждения $\omega(t)$ можно получить относительный остаточный ресурс оборудования как $(1 - \omega(t))$. С позиций управления ресурсом будущую наработку до отказа можно рассчитать как

$$t^{res} = (1 - \omega(t))\tau_{res},$$

где τ_{res} – максимальное время наработки, рассчитываемое для ожидаемых значений эксплуатационных параметров на будущий период. Ожидаемые значения в данном случае – это те значения параметров, которые реальны в эксплуатации и могут максимально

увеличить остаточный ресурс. На рисунке 2 показано изменение интенсивности отказов в процессе эксплуатации и влияние улучшенных условий эксплуатации на величину остаточного ресурса [6].

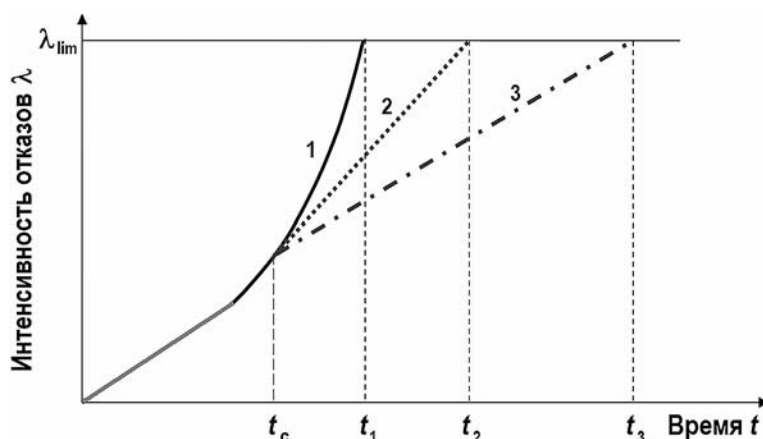


Рис. 2. Влияние факторов на величину остаточного ресурса

В модельном примере, показанном на рисунке, сплошная линия 1 отражает действующую нагрузку S_1 ; следующая пунктирная 2 – меньшую нагрузку S_2 ; еще меньшую нагрузку S_3 отражает штрих-пунктирная линия 3. Если в начале старения (t_c) или просто в расчетной точке изменить значения действующих факторов в сторону минимизации повреждающего воздействия, то остаточный ресурс ($t_1 - t_c$) можно существенно увеличить, рассматривая ($t_2 - t_c$) при нагрузке S_2 или ($t_3 - t_c$) при нагрузке S_3 .

Приведенные выше выводы и алгоритмы следует считать справедливыми для элементов, толщина которых достаточно велика. Для тонкостенных конструкций, когда

$$h/R \approx 0,1,$$

где h – толщина стенки, а R – срединный радиус, накопление повреждений оказывается нелинейным даже при медленно меняющихся напряжениях и температуре [9]. А это требует разработки другой – нелинейной – модели.

Таблица 1

Результаты расчетов остаточного ресурса, тыс. ч

C, мкг/кг	Линейное суммирование			Нелинейное суммирование		
	d = 16%*	d = 18%	d = 20%	d = 16%*	d = 18%	d = 20%
O ₂ = 10; Cl ⁻ = 50	200	358	455	147	271	351
O ₂ = 10; Cl ⁻ = 100	104	125	157	87	101	131
O ₂ = 10; Cl ⁻ = 150	63	78	101	49	60	87
O ₂ = 50; Cl ⁻ = 50	118	161	213	98	146	175
O ₂ = 50; Cl ⁻ = 100	23	28	38	17	21	29
O ₂ = 50; Cl ⁻ = 150	17	19	22	13	17	21

* d – предельная доля повреждённых ТОТ

На основе оценки технического состояния сборки ТОТ ПГ на некоторый момент времени спрогнозирован остаточный ресурс при различных возможных концентрациях хлорид-иона $C(Cl^-)$ и кислорода $C(O_2)$ (по нормам различных источников) с помощью линейной и нелинейной моделей суммирования повреждений. Рассчитана левая граница 95%-го доверительного интервала. Для принятого механизма деградации (КРН) и различных критериев предельного состояния d полученные результаты приведены в табл. 1 [6].

Из приведенных результатов видно, что расчеты остаточного ресурса, выполненные с использованием методики нелинейного суммирования, дают более низкие оценки по сравнению с методикой линейного суммирования, где остаточный ресурс прогнозируется на 29 – 36% больше. Для других механизмов старения и их моделей цифры будут другими.

ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА НА ОСНОВЕ ПРИНЦИПА СЕДЯКИНА

В вероятностном плане изменение условий эксплуатации непрерывным образом изменяет функцию вероятности безотказной работы (ВБР). В ряде случаев этот переход может быть описан правилом сдвига по времени на основе принципа Н.М. Седякина [4]:

$$P_{x^*}(t) = \begin{cases} P_{x_1}(t), & 0 \leq t < t_1, \\ P_{x_2}(t - t_1 + t^*), & t \geq t_1. \end{cases} \quad (1)$$

Иными словами, при переключении нагрузки в точке t_1 со значения x_1 на значение x_2 изменение функции ВБР $P_{x^*}(t)$ происходит непрерывным образом, переходя от $P_{x_1}(t)$ к $P_{x_2}(t)$ по правилу (1), где моменты t_1 и t^* эквивалентны в смысле принципа Седякина. На рисунке 3 показано поведение функции ВБР при смене нагрузки со значения x_1 на значение x_2 , где x_2 меньше, чем x_1 . Другими словами, меняется функция интенсивности отказов.

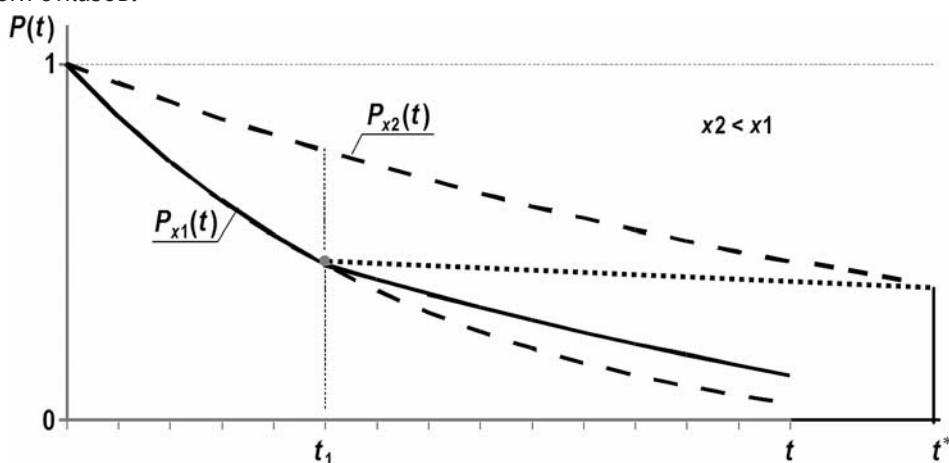


Рис. 3. Изменение ВБР при смене нагрузки ($x_2 < x_1$)

Задача состоит в том, чтобы для новых условий правильно описать ВБР и оценить остаточный ресурс.

Рассмотрим эту задачу на примере прогнозирования количества заглушенных ТОТ ПГ в модели на основе распределения Вейбулла [11]. Это статистическая модель, и качество оценок в ней зависит от мощности выборки, а существенные изменения в эксплуатации приводят к нарушению ее однородности. И в новых условиях статистику приходится набирать заново. В таком случае можно предложить использовать принцип Седякина в предположении, что вид распределения количества заглушенных ТОТ останется прежним (закон Вейбулла), а его параметры, соответственно, изменятся после изменения условий эксплуатации или проведения эффективного профилактического мероприятия в момент времени t_1 . Используя полученные в [11] зависимости для вероятности отказа

$$F(t) = 1 - e^{-(t/\tau)^b} \quad (2)$$

и коэффициентов распределения

$$\ln \tau = \frac{(\sum k_i)(\sum \ln^2 t_i) - (\sum k_i \cdot \ln t_i)(\sum \ln t_i)}{((\sum k_i)(\sum \ln t_i) - m(\sum k_i \cdot \ln t_i))}, \quad b = \frac{\sum_{i=1}^m k_i}{\sum \ln t_i - m \cdot \ln \tau}, \quad (3)$$

после двойного логарифмирования получим линеаризованную зависимость

$$\ln(-\ln(1 - F(t))) = \ln(t/\tau)^b = b \cdot \ln t - b \cdot \ln \tau. \quad (4)$$

Поскольку функция распределения $F(t_i)$ может быть оценена как

$$(\sum_{i=1}^m N_i) / N,$$

где N_i – количество заглушенных ТОТ в момент времени t_i , а N – общее количество ТОТ в сборке, то аналогичные (4) преобразования следует сделать и с приближенной функцией:

$$k_m = \ln(\ln N - \ln(N - \sum_{i=1}^m N_i)). \quad (5)$$

В соответствии с принципом (1) в точке $t = t_1$ справедливо $F_{x1}(t_1) = F_{x2}(t^*)$, т.е.

$$b_1 \ln t_1 - b_1 \ln \tau_1 = b_2 \ln t^* - b_2 \ln \tau_2.$$

Отсюда $t^* = \exp(b_1 \ln t_1 - b_1 \ln \tau_1 + b_2 \ln \tau_2) / b_2$ или

$$t^* = t_1^{b_1} \cdot \tau_2^{b_2} \cdot \tau_1^{-b_1}. \quad (6)$$

Таким образом, новое распределение после перехода к нагрузке x_2 – это

$$F_{x2}(b_2, \tau_2, t - t_1 + t^*).$$

Коэффициенты (b_2, τ_2) можно найти из статистики ЗТОТ и, с учетом (6), хотя бы в два следующих момента времени контроля $((m+1)$ и $(m+2)$ в формуле (5)).

При проведении ремонта или модернизации объекта настоящий принцип не может быть применен в силу того, что накопленное повреждение объекта данными мероприятиями изменено, т.е. объект частично восстановлен. Поэтому использование уравнения (1) невозможно. Однако можно использовать другие методы – например, введение параметра глубины восстановления при описании ВБР или интенсивности отказов.

ОЦЕНКА ЧАСТОТЫ ОТКАЗА НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ РОСТА УСТАЛОСТНОЙ ТРЕЩИНЫ

Для оценки ресурса трубопроводов одной из моделей является «течь перед разрушением» (ТПР). Такая модель используется в детерминированной постановке. Однако для задач ВАБ можно получить необходимые оценки частоты отказа, если воспользоваться следующей методикой.

Проводимый на этапе проектирования расчет по постулируемому дефекту даст значение ожидаемого ресурса (средний ресурс) t . Учитывая, что интенсивность отказов λ в общем виде равна $\lambda = 1/t$, где t – средний ресурс (среднее время до достижения предельного состояния), можно найти вероятность безотказной работы

$$P(\tau) = \exp\left(-\int_0^{\tau} \lambda(t) dt\right).$$

При $\lambda = \text{const}$ получаем экспоненциальное распределение. В работе [12] показано, что при $t < 1/\lambda$ выполняется соотношение ВБР $(t) \geq \exp(-\lambda t)$.

Другими словами, экспоненциальное распределение снизу аппроксимирует реальную ВБР, т.е. является консервативной оценкой. Это простой вариант получения оценок на стадии проектирования.

На стадии эксплуатации зависимость λ от t можно получить, последовательно рас-

считывая время до предельного состояния по максимальному обнаруженному в i -й контроль дефекту – t_i .

По определению, частота отказов

$$a(t) = \lambda(t) \cdot P(t)$$

или

$$a(t) = \lambda(t) \cdot \exp\left(-\int_0^t \lambda(u) du\right).$$

Поскольку контроль имеет дискретный характер, то справедливо соотношение

$$a(t) = \lambda(t) \cdot \prod_i \exp(-\lambda(t_i) \cdot \Delta t_i),$$

где $t = \sum \Delta t_i$. Окончательно получаем

$$a(t) = \lambda(t) \cdot \exp(-\sum \lambda(t_i) \cdot \Delta t_i).$$

Здесь интенсивность отказов относится уже к точке t и равна

$$\lambda = 1/(t + t_{\text{ост}}),$$

где $t_{\text{ост}}$ – остаточный ресурс, рассчитанный в момент t по результатам контроля в данный момент времени.

Аналогичный подход может быть применен и к другим моделям, относящимся к детерминированному расчету.

Рассмотрим примеры оценки частоты отказа для модели суммирования повреждений при циклическом нагружении трубопровода системы КТР. Самый консервативный прогноз ресурса выполняется на стадии проектирования. Например, для назначенного ресурса РУ в 60 лет максимальное накопленное усталостное повреждение при малоцикловом нагружении с учетом всех проектных режимов в некоторой расчетной точке патрубка Ду 850 АЭС № 1 ВВЭР-1200 равно $\omega_1 = 0,0832$. Очевидно, что общий ресурс в данном случае составляет 721 год. Тогда интенсивность отказов $\lambda_1 = 1,30 \cdot 10^{-3}$ 1/г, а частота отказов будет зависеть от времени, например, для $t = 20$ лет $a(t) = 1,27 \cdot 10^{-3}$ 1/г, а для $t = 40$ лет $a(t) = 1,23 \cdot 10^{-3}$ 1/г.

Еще один пример. Для врезки АВНД в горячую нитку ГЦТ-3 (патрубок) Ду 300 для энергоблока № 3 АЭС «Тяньвань» (реакторная установка В-428М) максимальное накопленное усталостное повреждение при малоцикловом нагружении с учетом всех проектных режимов равно $\omega_2 = 0,4903$. Тогда интенсивность отказов $\lambda_2 = 9,31 \cdot 10^{-3}$ 1/г. Фактическое нагружение является более мягким: расчеты показали, что поврежденность за год равна 0,0107, а за два года – 0,0122. Интенсивность отказов после второго года – $\lambda_{22} = 6,1 \cdot 10^{-3}$ 1/г. Соответственно частота отказов для $t = 20$ лет составит $a(t) = 6,0 \cdot 10^{-3}$ 1/г, а для $t = 40$ лет – $a(t) = 5,7 \cdot 10^{-3}$ 1/г.

При прогнозировании остаточного ресурса в настоящее время используется предположение, что в дальнейшем эксплуатационные режимы будут примерно теми же, что и до момента контроля. Однако рациональнее учитывать те режимы, которые рассмотрены в техническом проекте, но пока не реализованы в эксплуатации. Работа в этом направлении продолжается.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Объективно существующие неопределенности при оценке технического состояния элементов трубопроводов требуют использования различных статистических процедур для описания их работоспособности. Методы получения оценок ресурса при различных описаниях процессов старения относятся к задаче пересечения уровня либо процессом накопления повреждений, либо наблюдаемым или расчетным процессом, и используют

соответствующее математическое описание анализируемых процессов.

2. Оценка остаточного ресурса на основе суммирования повреждений в ТОТ ПГ, где в качестве основного процесса старения использована математическая модель коррозионного растрескивания под напряжением, приведена в качестве примера. Вероятностная оценка остаточного ресурса получена на основе линейной и нелинейной моделей суммирования повреждений, построенных путем введения вероятностной меры повреждения. Различие в оценках для рассмотренной ситуации достигает 30%. Для других математических моделей эти цифры могут отличаться.

3. Статистика глушений ТОТ ПГ позволяет прогнозировать остаточный ресурс при одних и тех же условиях эксплуатации. Для случая смягчения условий эксплуатации, т.е. перехода на меньшую нагрузку, на основе принципа Н.М. Седякина для модели Вейбулла получена оценка выигрыша в остаточном ресурсе (временной сдвиг).

4. Для процесса роста усталостной трещины в металле трубопровода предложен способ получения вероятностных показателей для детерминированных моделей расчета ресурса как на этапе проектирования, так и на этапе эксплуатации.

5. Разработанные процедуры позволяют находить оценки показателей надежности трубопроводов КТР с учетом неопределенностей и данных периодического контроля как для задач ВАБ, так и для планирования профилактических мероприятий при управлении ресурсом и оптимизации объемов контроля в ППР.

6. Оценка ресурса элементов на этапе технического проектирования включает в себя все группы режимов эксплуатации. Фактические режимы нагружения при соблюдении правил эксплуатации оказываются, как правило, менее напряженными, чем расчетные, что снижает интенсивность расходования заложенных запасов и обеспечивает резерв по остаточному ресурсу оборудования. Прогноз остаточного ресурса для тех же условий эксплуатации может оказаться излишне оптимистичным. Рациональнее при прогнозировании учитывать те режимы, которые рассмотрены в техническом проекте, но пока не реализованы в эксплуатации.

Литература

1. НП-096-15. Требования к управлению ресурсом оборудования и трубопроводов атомных станций. Основные положения. – М.: Ростехнадзор, 2015. – 19 с. Электронный ресурс: https://standartgost.ru/g/%D0%9D%D0%9F_096-15 (дата доступа 18.06.2022).
2. Гулина О.М., Меркун А.В., Семишкин В.П. Риск-ориентированный подход в методологии управления ресурсом. // ВАНТ. – Сер. Физика ядерных реакторов. – 2021. – Вып. 2. – С. 92-98. Электронный ресурс: <http://www.nrcki.ru/files/pdf/VANT-2021-2.pdf> (дата доступа 18.06.2022).
3. Егишянц С.А., Гулина О.М., Коновалов Э.Н. Оценка распределения ресурса при суммировании повреждений. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 1997. – № 1. – С. 18-21.
4. Антонов А.В., Никулин М.С. Статистические методы в теории надежности. – М.: Абрис, 2012. – 390 с.
5. Дмитриенко А.Г., Блинов А.В., Волков Д.В., Волков В.С. Техническая диагностика. Оценка состояния и прогнозирование остаточного ресурса технически сложных объектов. / Уч. пособ. под ред. Д.И. Нефедьева, Б.В. Цыпина. – Пенза: Пензенский государственный университет, 2013. – 62 с. Электронный ресурс: https://dep_pribor.pnzgu.ru/files/dep_pribor.pnzgu.ru/uchebnoe_posobie_iyul_2013.pdf (дата доступа 18.06.2022).
6. Гулина О.М. Физико-статистические модели управления ресурсом оборудования второго контура атомных электростанций. Дисс. д.т.н. – Обнинск: ИАТЭ, 2009. – 344 с.
7. Семишкин В.П., Богачев А.В., Меркун А.В., Шарый Н.В. Управление ресурсом пассивных компонентов РУ ВВЭР (введение в методологию). // Тяжелое машиностроение. – 2017. – № 9. – с. 2-9.

8. ПНАЭ Г-7-002-86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 528 с. Электронный ресурс: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/5c7/4293842075.pdf> (дата доступа 18.06.2022).
9. Лихачев Ю.И., Пупко В.Я. Прочность тепловыделяющих элементов ядерных реакторов. – М.: Атомиздат, 1975. – 278 с.
10. Гулина О.М., Сальников Н.Л. Расчет ресурсных характеристик оборудования в условиях нелинейных эффектов процессов деградации. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 1999. – № 4. – С. 11-15.
11. Гулина О.М., Романчук Н.С., Меркун А.В. Использование статистических процедур при оценивании количества заглушенных трубок парогенератора. // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов. – 2020. – Вып. 2. – С. 34-42. Электронный ресурс: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/vant/va-20-s2.pdf> (дата доступа 18.06.2022).
12. Барлоу Р., Прошан Ф. Математическая теория надежности. – М.: Советское радио, 1969. – 488 с.

Поступила в редакцию 20.06.2022 г.

Авторы

Гулина Ольга Михайловна, главный специалист, профессор, д-р техн. наук

E-mail: omgulina18@mail.ru

Меркун Анастасия Валерьевна, инженер-конструктор 1 категории

E-mail: a-merkun@mail.ru

Семишкин Валерий Павлович, зам. генерального конструктора, начальник отдела, д-р техн. наук

E-mail: semishkin@grpress.podolsk.ru

UDC 620.193.4+519.216.3

PROBABILISTIC ESTIMATION OF THE RESIDUAL LIFETIME OF THE VVER COOLANT LOOP ELEMENTS IN AGING CONTROL

Gulina O.M., Merkun A.V., Semishkin V.P.

ОКБ Гидропресс JSC

21 Ordzhonikidze Str., 142103 Podolsk, Russia

ABSTRACT

The main processes that limit the lifetime of the elements of the reactor coolant circuit (RCC) are high- and low-cycle fatigue, various types of embrittlement of materials as well as fatigue crack growth. These processes can be intensified by the influence of corrosion. Important for making decisions on the operation of the RCC is the residual resource, i.e., the time to the limit state, on the basis of which the lifetime (aging) is controlled. The residual life is estimated using mathematical models (both analytical and simulation ones) of aging processes in the form that is possible on the basis of the existing operating experience and control data. Methods for obtaining estimates of residual lifetime for various descriptions of aging processes are related to the problem of level crossing either by an observed process, or by a damage accumulation process, or by a fatigue crack growth process. In this case, the traditional deterministic conservative calculation can be supplemented by obtaining a probabilistic estimate of the lifetime, if relevant information is available, in the form of operational control data, as well as taking into account the uncertainties associated with the characteristics of the metal, the quality of the control means, the method of mathematical description of the operating modes of the elements, etc. The article deals with the issues of obtaining probabilistic lifetime estimates as indicators of reliability for some models of

aging processes as part of lifetime management. The idea refers to ways of building a time series using control points and obtaining lifetime estimates with appropriate confidence intervals.

Key words: lifetime management, aging processes, residual lifetime, damage accumulation, failure rate.

REFERENCES

1. NP-096-15. *Requirements for Lifetime Management of Equipment and Pipelines of Nuclear Power Plants. Basic Provisions*. Moscow. Rostekhnadzor Publ., 2015, 19 p. Available at: https://standartgost.ru/g/%D0%9D%D0%9F_096-15 (accessed Jun. 18, 2022) (in Russian).
2. Gulina O.M., Merkun A.V., Semishkin V.P. Risk-Informed Approach in Ageing Management Methodology. *VANT. Ser. Fizika Yadernykh Reaktorov*. 2021, iss. 2, pp. 92-98. Available at: (accessed Jun. 18, 2022) (in Russian).
3. Egishyants S.A., Gulina O.M., Konovalov E.N. Estimation of Lifetime Distribution under Damages Accumulation. *Izvestia Vysshikh Uchebnykh Zawedeniy. Yadernaya Energetika*. 1997, no. 1, pp.18-21 (in Russian).
4. Antonov A.V., Nikulin M.S. *Statistical Methods in Reliability Theory*. Moscow. Abris Publ., 2012, 390 p. (in Russian).
5. Dmitrienko A.G., Blinov A.V., Volkov D.V., Volkov V.S. *Technical Diagnostics. Assessment of the State and Forecasting of the Residual Lifetime of Technically Complex Objects*. Textbook. Eds. D.I. Nefediev, B.V. Tsy-pin. Penza. Penzensky Gosudarstvennyy Universitet Publ., 2013, 62 p. Available at: https://dep_pribor.pnzgu.ru/files/dep_pribor.pnzgu.ru/uchebnoe_posobie_iyul_2013.pdf (accessed Jun. 18, 2022) (in Russian).
6. Gulina O.M. *Physic-Statistical Models of Lifetime Management of Equipment of the Second Circuit of Nuclear Power Plants*. Dr. Sci. (Engineering) Diss. Obninsk. IATE MEFPI Publ., 2009, 344 p.
7. Semishkin V.P., Bogachev A.V., Merkun A.V., Shary N.V. Lifetime Management of Passive Components of VVER Reactor Plants (Introduction to Methodology). *Tyazhyoloe Mashinostroenie*. 2017, no. 9, pp. 2-9 (in Russian).
8. PNAE G-7-002-86. *Standards for Calculating the Strength of Equipment and Pipelines of Nuclear Power Plants*. Moscow. Energoatomizdat Publ., 1989, 528 p. Available at: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/5c7/4293842075.pdf> (accessed Jun. 18, 2022) (in Russian).
9. Likhachyov Yu.I., Pupko V.Ya. *Strength of Fuel Elements of Nuclear Reactors*. – Moscow. Atomizdat Publ., 1975, 278 p. (in Russian).
10. Gulina O.M., Salnikov N.L. Calculation of Lifetime Characteristics of Equipment under the Conditions of Nonlinear Effects of Degradation Processes. *Izvestia Vysshikh Uchebnykh Zawedeniy. Yadernaya Energetika*. 1999, no. 4, pp. 11-15 (in Russian).
11. Gulina O.M., Romanchuk N.S., Merkun A.V. The Use of Statistical Procedures when Estimating the Number of Plugged Tubes of Steam Generator. *VANT. Ser. Fizika Yadernykh Reaktorov*. 2020, iss. 2, pp. 34-42. Available at: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/vant/va-20-s2> (accessed Jun. 18, 2022) (in Russian).
12. Barlow R., Proshan F. *Mathematical Theory of Reliability*. Moscow. Sovetskoe Radio Publ., 1969, 488 p. (in Russian).

Authors

Gulina Olga Mikhailovna, Chief Specialist, Professor, Dr. Sci. (Engineering)
E-mail: omgulina18@mail.ru

Merkun Anastasiya Valerievna, First Category Design Engineer
E-mail: a-merkun@mail.ru

Semishkin Valery Pavlovich, Deputy General Designer, Head of Department, Professor, Dr. Sci. (Engineering)
E-mail: semishkin@grpress.podolsk.ru