НАДЕЖНОСТЬ, ПРОЧНОСТЬ, ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ МАШИН И КОНСТРУКЦИЙ

УДК 539.4

ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С УЧЕТОМ СТАТИСТИЧЕСКОГО РАЗБРОСА МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЧНОСТИ МАТЕРИАЛА И ОСТАТОЧНОЙ ДЕФЕКТНОСТИ

© 2021 г. Ю. Г. Матвиенко[1], Д. А. Кузьмин[2], Д. О. Резников[1,*], В. В. Потапов[2]

[1] Институт машиноведения им. А.А. Благонравова, РАН, Москва, Россия

[2] Всероссийский научно-исследовательский институт по эксплуатации атомных электростанций, Москва, Россия

**e-mail: mibsts@mail.ru*

Поступила в редакцию 30.12.2020 г.
После доработки 30.03.2021 г.
Принята к публикации 26.04.2021 г.

В статье представлен метод оценки вероятности разрушения конструктивных элементов технических систем под действием однократных статических и циклических нагрузок, позволяющий учитывать разброс механических свойств материалов и размеров, остаточных макродефектов, невыявленных в ходе неразрушающего контроля. Представленный метод можно использовать при реализации вероятностного и риск-ориентированного подходов к обеспечению прочности, ресурса и безопасности технических систем в реальных условиях эксплуатации и корректировке типовых программ эксплуатации с точки зрения выбора периодичности и объема неразрушающего контроля

Ключевые слова: прочность, трещиностойкость, вероятность разрушения, неразрушающий контроль, дефектность

DOI: 10.31857/S0235711921040076

1. Постановка задачи. В задачах оценки и обеспечения конструкционной прочности и ресурса конструктивных элементов технических систем в реальных условиях эксплуатации неизбежно присутствует высокий уровень неопределенности, обусловленный вариативностью механических свойств и стохастической природой процессов их деградации, а также разбросом размеров трещин и других макродефектов. Дефекты могут возникнуть при изготовлении, монтаже или в процессе эксплуатации и не быть выявленными средствами неразрушающего контроля, которые не позволяют на современном уровне развития техники обеспечить 100% выявляемость дефектов. Вследствие чего на практике всегда приходится учитывать наличие остаточной дефектности, под которой понимается совокупность дефектов, которая остается в оборудовании после неразрушающего контроля и ремонта выявленных дефектов [1–4]. Отдельная группа неопределенностей связана с вариативностью режимов эксплуатационных нагружений, а также возможностью реализации расчетных и нерасчетных экстремальных воздействий на рассматриваемые конструктивные элементы.

Конструкционная прочность и эксплуатационный ресурс рассматриваемых конструктивных элементов считаются обеспеченными, если для всей совокупности доминирующих механизмов достижения предельных состояний $i = 1, 2, ..., k$ на протяжении всего срока эксплуатации элемента $T_Э$ выполняются условия [5–12]

$$\Sigma_i^C(t)/\Sigma_i^Э(t) > 1, \quad i = 1, 2, ..., k \quad \forall t \in [0; T_э], \tag{1}$$

где $\Sigma_i^C(t)$ – предельные характеристики прочности, трещиностойкости, надежности, ресурса, живучести элемента (далее характеристики несущей способности), $\Sigma_i^Э(t)$ – соответствующие им факторы эксплуатационного нагружения (далее нагрузки).

Традиционно при решении задач прочности раскрытие указанных неопределенностей осуществлялось в рамках детерминистического подхода путем введения системы запасов прочности $n_1, n_2, ..., n_k$ по основным механизмам достижения предельных состояний, при которых неопределенные параметры $\Sigma_i^C(t)$, $\Sigma_i^Э(t)$ $(i = 1, 2, ..., k)$ в системе неравенств (1) заменяются на их детерминированные характеристики, например, математические ожидания $E\{\Sigma_i^C(t)\}$, $E\{\Sigma_i^Э(t)\}$, а для компенсации возможных отклонений от указанных математических ожиданий (в том числе, минимизации влияния неучтенных нагрузок), вместо числа 1 в правые части неравенств (1) вводятся соответствующие величины запасов $n_1 > 1, n_2 > 1, ..., n_k > 1$

$$E\{\Sigma_i^C(t)\}/E\{\Sigma_i^Э(t)\} > n_i; \quad i = 1, 2, \dots, k; \quad \forall t \in [0; T_э].$$

С развитием вероятностного и далее риск-ориентированного подходов, обусловленных необходимостью решения проблем по минимизации затрат жизненного цикла, встает задача оценки вероятности разрушения конструктивных элементов под действием рассматриваемых режимов нагружения ($P_{F1}, P_{F2}, ..., P_{Fk}$) [12] и сопоставления полученных оценок с некоторыми нормативными предельно-допустимыми значениями вероятности разрушения $[P_F]$, которая в зависимости от ответственности рассматриваемой конструкции выбирается в диапазоне 10^{-5}–10^{-8}, год$^{-1}$ [9, 13]. При этом конструкционная прочность и эксплуатационный ресурс рассматриваемого конструктивного элемента по основным механизмам достижения предельных состояний считаются обеспеченными, если выполняется система неравенств

$$P_{Fi}(t) = P(\Sigma_i^C(t)/\Sigma_i^Э(t) < 1) < [P_{Fi}(t)], \quad i = 1, 2, \dots k, \quad \forall t \in [0; T_э].$$

Решение поставленной задачи в вероятностной постановке предполагает описание неопределенностей с помощью вероятностных распределений неопределенных параметров и получение расчетных оценок вероятности разрушения аналитическим или численным способом. Отдельной задачей является обоснованный выбор значений нормативных, предельно-допустимых значений вероятности разрушения $[P_{Fi}(t)]$ по рассматриваемым механизмам достижения предельных состояний, который осуществляется с учетом критичности элемента и последствий, наступающих в случае его разрушения.

2. Оценка вероятности разрушения элемента при однократном статическом нагружении. Используя записанную в интегральной форме теорему о полной вероятности, уравнение для оценки вероятности разрушения компонента, находящегося в хрупком состоянии и содержащего трещиноподобный дефект, можно записать в виде [1, 2]

$$P_F = \int\limits_{K_{Ic\min}}^{K_{Ic\max}} f_{K_{Ic}}(K_{Ic}) \int\limits_{\sigma_{\min}}^{\sigma_{\max}} f_\sigma(\sigma) P(a \ge a_c) d\sigma dK_{Ic},$$

где P_F – вероятность разрушения; $F_{KIc}(K_{Ic})$ – интегральная функция распределения вязкости разрушения K_{Ic}; $f_\sigma(\sigma)$ – функция плотности распределения напряжения σ; a – вероятностная величина “характерный размер дефекта”, под которой, можно понимать, например, глубину трещины; $F(a)$ – интегральная функция распределения размера дефекта; $P(a \geq a_C)$ – вероятность того, что размер дефекта превысит критическую величину a_C: $F(a_C) = P(a < a_C) = 1 - P(a > a_C) \to P(a > a_C) = 1 - F(a_C)$.

Коэффициент интенсивности напряжений в зоне поверхностной трещины определяют по уравнению $K_I = f_k \sigma \sqrt{\pi a}$, где f_k – корректирующая функция на геометрию и размер трещины, ее место расположения и схему нагружения.

Если ввести допущение о детерминированности приложенных напряжений (σ), то вероятность разрушения будет определяться более простым выражением

$$P_F = \int_{K_{Ic\min}}^{K_{Ic\max}} f_{KIc}(K_{Ic}) P(a \geq a_c) dK_{Ic} = \int_{K_{Ic\min}}^{K_{Ic\max}} f_{KIc}(K_{Ic}) \left(1 - F(a_c)\right) dK_{Ic}. \tag{2}$$

Выражение (2) представляет собой запись теоремы о полной вероятности: вероятность разрушения представляет собой сложное событие $a > a_C(K_{Ic}) | K_{Ic} \in dK_{Ic}$, объединяющее два связанных события: 1) событие *1* – вязкость разрушения K_{Ic} оказывается в интервале dK_{Ic} ($K_{Ic} \in dK_{Ic}$). Вероятность этого события равняется $f_{KIc}(K_{Ic})dK_{Ic}$; 2) событие *2* – размер дефекта a превышает критическую величину a_C ($a > a_C$). Вероятность этого события, соответственно, $P(a > a_C)$.

Пределы интегрирования в выражении (2) можно выбрать из условия

$$K_{Ic\min} = E\{K_{Ic}\} - 3S\{K_{Ic}\} = E\{K_{Ic}\}(1 - 3\nu_{KIc}),$$

$$K_{Ic\max} = E\{K_{Ic}\} + 3S\{K_{Ic}\} = E\{K_{Ic}\}(1 + 3\nu_{KIc}),$$

где $E\{K_{Ic}\}$ и $S\{K_{Ic}\}$ – математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение величины вязкости разрушения K_{Ic}; $\nu_{KIc} = S\{K_{Ic}\}/E\{K_{Ic}\}$ – коэффициент вариации величины K_{Ic}.

Пусть величина вязкости разрушения распределена по нормальному закону

$$f_{KIc}(K_{Ic}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} S\{K_{Ic}\}} e^{-\frac{(K_{Ic} - E\{K_{Ic}\})^2}{2 \cdot S_{KIc}^2}}.$$

Будем считать, что случайная величина “характерный размер дефекта” распределена согласно экспоненциальному закону [1] (рис. 1, кривая *1*)

$$F(a) = 1 - e^{-\frac{a}{E\{a\}}}, \tag{3}$$

где $E\{a\}$ – математическое ожидание случайной величины a.

Тогда второй множитель подынтегрального выражения в уравнении (2) можно записать в виде

$$P(a \geq a_C) = 1 - F(a_C) = e^{-\frac{a_C}{E\{a\}}}. \tag{4}$$

При этом уравнение (2) можно переписать как

$$P_F = \int_{K_{Ic\min}}^{K_{Ic\max}} \frac{1}{\sqrt{2\pi} S\{K_{Ic}\}} e^{-\frac{(K_{Ic} - E\{K_{Ic}\})^2}{2 \cdot S_{KIc}^2}} e^{-\frac{a_C}{E\{a\}}} dK_{Ic}.$$

Учитывая, что

$$a_C = \left(\frac{K_{Ic}}{f_k \sigma \sqrt{\pi}}\right)^2, \tag{5}$$

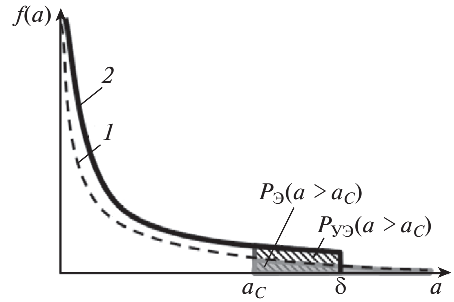

Рис. 1. Распределение величины “размер дефекта” a: *1* – экспоненциальное распределение (Э); *2* – усеченное экспоненциальное распределение (УЭ).

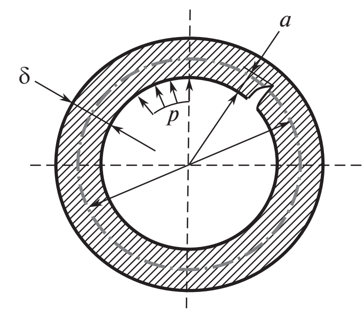

Рис. 2. Рассматриваемый конструктивный элемент.

получим выражение для вероятности разрушения конструктивного элемента с трещиной

$$P_F = \int_{K_{Ic\min}}^{K_{Ic\max}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}S\{K_{Ic}\}} e^{-\frac{(K_{Ic}-E\{K_{Ic}\})^2}{2S\{K_{Ic}\}^2}} e^{-\frac{1}{E\{a\}}\left(\frac{K_{Ic}}{f_k\sigma\sqrt{\pi}}\right)^2} dK_{Ic}. \quad (6)$$

Рассмотрим численный пример расчета вероятности разрушения элемента трубопровода, нагруженного внутренним давлением, содержащего осевую поверхностную трещину на внутренней стенке (рис. 2). Исходные данные задачи приведены в табл. 1.

В рассматриваемом примере для консервативной оценки допускается в качестве характерного размера трещины a принимать ее глубину, т.е. рассматривать протяжен-

Таблица 1. Численные значения параметров

Внутреннее давление в трубопроводе, p_0 (МПа)	8
Диаметр, D (м)	1.26
Толщина стенки, δ (м)	0.025
Окружное напряжение, σ (МПА)	201.6
Вязкость разрушения, K_{Ic}	
Математическое ожидание, $E\{K_{Ic}\}$ (МПа $\sqrt{м}$)	61
Коэффициент вариации, ν_{KIc}	0.1

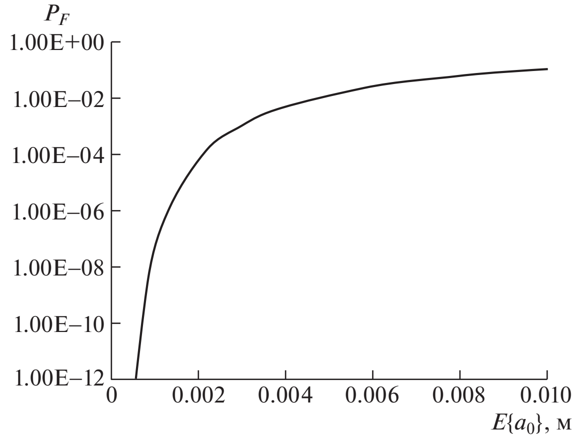

Рис. 3. Зависимость вероятности хрупкого разрушения при однократном статическом нагружении от математического ожидания глубины трещины.

ный дефект длиной, превышающей на порядок ее глубину. Значение корректирующей функции f_k для протяженного дефекта в выражении для коэффициента интенсивности напряжения принимается равным 1.12 [15].

Будем считать, что после проведения неразрушающего контроля осуществляется идентификация и ремонт выявленных дефектов. При этом размер невыявленных дефектов, определяемый качеством (объемом и глубиной) проведения неразрушающего контроля, является вероятностной величиной, распределенной по экспоненциальному закону. В рассматриваемом примере ее математическое ожидание принимается равным $E\{a\} = 2.00 \times 10^{-3}$. Иными словами, при проведении расчета постулируется наличие дефекта типа трещины, глубина которой точно неизвестна и считается вероятностной величиной, распределенной по экспоненциальному закону с математическим ожиданием $E\{a\} = 2.00 \times 10^{-3}$ м.

Согласно соотношению (6) для рассматриваемого примера вероятность разрушения элемента при однократном статическом нагружении составляет $P_F = 6.51 \times 10^{-5}$.

Зависимость вероятности разрушения от величины математического ожидания размера трещины $E\{a\}$ представлена на рис. 3.

Если вместо экспоненциального по выражению (4) в качестве распределения глубины трещины a использовать усеченное экспоненциальное распределение вида

$$F(a) = \frac{1}{1 - e^{-\frac{1}{E\{a\}}\delta}} - \frac{e^{-\frac{1}{E\{a\}}a}}{1 - e^{-\frac{1}{E\{a\}}\delta}}, \tag{7}$$

с параметром δ равным толщине стенки элемента, позволяющее учесть естественное ограничение для величины a, то с помощью аналогичных преобразований можно получить уточненную оценку вероятности разрушения рассматриваемого конструктивного элемента

$$P_F = \int_{K_{Ic\min}}^{K_{Ic\max}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}S\{K_{Ic}\}} e^{-\frac{(K_{Ic} - E\{K_{Ic}\})^2}{2\cdot S_{KIc}^2}} \left(1 - \frac{1}{1 - e^{-\frac{1}{E\{a\}}\delta}} + \frac{e^{-\frac{1}{E\{a\}}a_c}}{1 - e^{-\frac{1}{E\{a\}}\delta}}\right) dK_{Ic}.$$

Таким образом, в случае использования в рассмотренном численном примере усеченного экспоненциального распределения вероятность разрушения составит $P_F = 6.14 \times 10^{-5}$. При этом различие оценок вероятности разрушения при использовании экспоненциального и усеченного экспоненциального распределений составляет порядка 6%.

3. Оценка вероятности усталостного разрушения с учетом разброса начальных размеров трещины a_0 и вязкости разрушения K_{Ic}. Рассмотрим задачу циклического нагружения конструктивного элемента с трещиноподобным дефектом. Используя (2), можно записать выражение для оценки вероятности разрушения после N циклов нагружения с учетом подрастания трещины от исходной глубины a_0 до текущей глубины a_N

$$P_{F_N} = P_F(\tau_N) = \int\limits_{K_{Ic\min}}^{K_{Ic\max}} f_{K_{Ic}}(K_{Ic}) P(a_N > a_C) dK_{Ic}. \tag{8}$$

Будем считать, что кинетика трещины описывается модифицированным уравнением Пэриса

$$\frac{da}{dN} = C\left(\frac{\Delta K}{1 - R}\right)^m, \tag{9}$$

где C и m – постоянные, зависящие от материала и условий нагружения; R – коэффициент асимметрии цикла нагружения; ΔK – размах коэффициента интенсивности напряжений в цикле нагружения. Будем считать, что начальный размер трещины a_0 является случайной величиной, распределенной по экспоненциальному закону (3).

При этом глубина трещины после N циклов нагружения будет являться функцией случайной величины “начальная глубина трещины” a_0, т.е. между случайными величинами a_N и a_0 будет существовать детерминированная функциональная зависимость. Разделяя переменные и интегрируя левую и правую части выражения (9) можно получить

$$N = \frac{a_N^{1-\frac{m}{2}} - a_0^{1-\frac{m}{2}}}{C\left(1 - \frac{m}{2}\right)\left(\frac{f_k\sqrt{\pi}}{(1 - R)}\Delta\sigma\right)^m}, \tag{10}$$

где a_N – глубина трещины после N циклов нагружения.

Из уравнения (10) можно записать выражение для глубины трещины после N циклов нагружения

$$a_N = \left(a_0^{1-\frac{m}{2}} + NC\left(1 - \frac{m}{2}\right)\left(\frac{f_k\sqrt{\pi}}{1 - R}\Delta\sigma\right)^m\right)^{\frac{2}{2-m}}. \tag{11}$$

Условие разрушения после N циклов нагружения имеет вид

$$a_N > a_C.$$

Таким образом, в рассматриваемой постановке величина a_N по выражению (11) будет являться функцией только случайной величины a_0.

Введем понятие критической начальной глубины трещины a_{0C_N} (рис. 4), под которой будем понимать такую начальную глубину трещины, которая после N циклов нагружения при заданном уровне размаха номинальных напряжений в цикле нагруже-

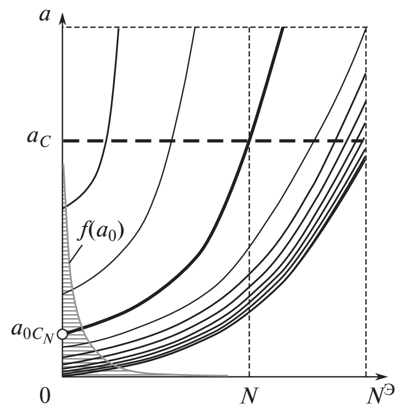

Рис. 4. Кинетика роста усталостных трещин с учетом разброса исходной дефектности.

ния $\Delta\sigma$ достигнет критического размера a_C, определяемого с учетом соотношения (5) и возможности изменения параметров цикла нагружения в виде

$$a_C = \left(\frac{K_{Ic}}{f_k \sigma_{\max}\sqrt{\pi}}\right)^2 = \left(\frac{K_{Ic}(1-R)}{f_k \Delta\sigma\sqrt{\pi}}\right)^2.$$

В связи с тем, что в рассматриваемой постановке кинетика роста трещины является детерминированной и между величинами a_0 и a_N существует детерминированная функциональная зависимость, условие разрушения в момент времени τ_N, соответствующий N циклам нагружения, можно выразить через соотношение между начальной глубиной трещины a_0 и величиной a_{0C_N}

$$a_0 > a_{0C_N}. \tag{12}$$

Величину a_{0C_N} можно получить, выразив a_0 из (10)

$$a_0 = \left(a_N^{(2-m)/2} - NC\left(1-\frac{m}{2}\right)\left(\frac{f_k}{1-R}\Delta\sigma\sqrt{\pi}\right)^m\right)^{2/(2-m)},$$

и подставив в него $a_N = a_C$ получим

$$a_{0C_N} = \left(a_C^{(2-m)/2} - NC\left(1-\frac{m}{2}\right)\left(\frac{f_k}{1-R}\Delta\sigma\sqrt{\pi}\right)^m\right)^{2/(2-m)}. \tag{13}$$

Учитывая (12), выражение для вероятности усталостного разрушения после N циклов нагружения (8) можно переписать в виде

$$P_F(\tau_N) = \int\limits_{K_{Ic\min}}^{K_{Ic\max}} f_{K_{Ic}}(K_{Ic}) P(a_0 > a_{0C_N}) dK_{Ic}. \tag{14}$$

Второй множитель подынтегрального выражения в уравнении (14) можно представить через функцию распределения $F(a_0)$ случайной величины “начальная глубина трещины”

$$P(a_0 > a_{0C_N}) = 1 - P(a_0 < a_{0C_N}) = 1 - F(a_{0C_N}).$$

Или с учетом (3) для экспоненциального распределения начальной глубины трещины a_0

$$P(a_0 > a_{0C_N}) = e^{-\frac{a_{0C_N}}{E\{a_0\}}}.$$

Тогда с учетом выражений (5) и (13)

$$P(a_0 > a_{0C_N}) = e^{-\frac{\left(\left(\frac{K_{IC}(1-R)}{f_k\Delta\sigma\sqrt{\pi}}\right)^{2-m} - NC\left(1-\frac{m}{2}\right)\left(\frac{f_k}{1-R}\Delta\sigma\sqrt{\pi}\right)^m\right)^{2/(2-m)}}{E\{a_0\}}}.$$

При этом выражение для оценки вероятности разрушения после N циклов нагружения можно записать в виде

$$P_F(\tau_N) = \int\limits_{K_{Ic\min}}^{K_{Ic\max}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}S\{K_{Ic}\}} e^{-\frac{(K_{Ic}-E\{K_{Ic}\})^2}{2S\{K_{Ic}\}^2}} e^{-\frac{\left(\left(\frac{K_{IC}(1-R)}{f_k\Delta\sigma\sqrt{\pi}}\right)^{2-m} - NC\left(1-\frac{m}{2}\right)\left(\frac{f_k}{1-R}\Delta\sigma\sqrt{\pi}\right)^m\right)^{2/(2-m)}}{E\{a_0\}}} dK_{Ic}. \quad (15)$$

Следовательно, вероятность усталостного разрушения (15) зависит от: 1) числа циклов нагружения N в интервале времени между проведением оценки состояния элемента методами неразрушающего контроля ($N = \nu\tau$, ν – годовая частота циклов, τ – интервал времени между проведением оценок состояния, год); 2) качества проведения неразрушающего контроля, которое определяет параметры распределения остаточной дефектности, которая не была выявлена в ходе неразрушающего контроля и, следовательно, была пропущена в эксплуатацию, $E\{a_0\}$; 3) размаха действующих напряжений $\Delta\sigma$; 4) параметров распределения величины вязкости разрушения K_{IC}. Первые два из перечисленных факторов позволяют сформировать программу эксплуатации рассматриваемого элемента с точки зрения периодичности и объема контроля, позволяющую обеспечить его конструкционную прочность, надежность, ресурс, безопасность при заданных режимах нагружения и свойствах конструкционного материала.

В качестве примера использования полученной расчетной зависимости обратимся к рассмотренному в п. 2 элементу трубопровода, который в данном случае будет подвергаться циклическому нагружению внутренним давлением со средним значением в цикле $p_0 = 7.6$ МПа, размахом за цикл нагружения $\Delta p = 0.8$ МПа, коэффициентом асимметрии цикла $R = 0.9$ и частотой нагружения $\nu = 500$ год$^{-1}$. Константы уравнения Пэриса принимаются равными: $C = 3.00 \times 10^{-11}$, $m = 2.9$.

При этом ставится задача определить интервалы времени τ между моментами проведения двух последовательных технических инспекций методами неразрушающего контроля, при которых вероятность разрушения не превысит предельно допустимой величины вероятности разрушения, которая в рассматриваемом примере выбирается на уровне $[P_F] = 5.0 \times 10^{-5}$ для трех расчетных случаев, когда значения математического ожидания пропущенного в эксплуатацию после неразрушающего контроля глубины трещины равны соответственно: $E\{a_0\} = 1 \times 10^{-3}$ м, $E\{a_0\} = 1.5 \times 10^{-3}$ м и $E\{a_0\} = 2 \times 10^{-3}$ м.

На рис. 5 представлены зависимости вероятности разрушения от промежутка времени между техническими инспекциями (τ) для указанных трех случаев. Из рис. 5 следует, что при избранной величине $[P_F]$ в случае *1* (когда $E\{a_0\} = 1 \times 10^{-3}$ м) интервал времени между проведением инспекций можно выбрать равным $[\tau_1] = 8$ лет и, соответственно, предельно допустимое число циклов нагружения $[N_1] = \nu[\tau_1] = 4000$ циклов; для случая *2* (когда $E\{a_0\} = 1.5 \times 10^{-3}$ м): $[\tau_2] = 2$ года и $[N_2] = 1000$ циклов; а в случае *3* (когда $E\{a_0\} = 2 \times 10^{-3}$ м) эксплуатация рассматриваемого элемента запрещена,

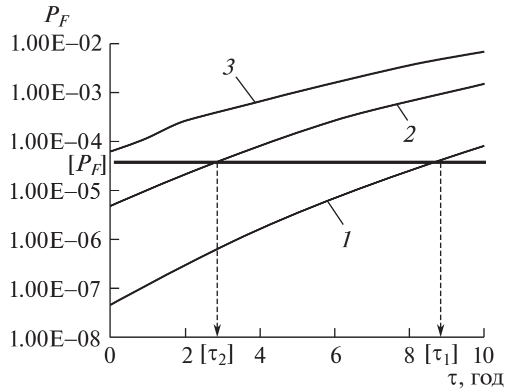

Рис. 5. Зависимости вероятности усталостного разрушения элемента для трех случаев: $E\{a_0\} = 1 \times 10^{-3}$ м (кривая *1*); $E\{a_0\} = 1.5 \times 10^{-3}$ м (кривая *2*) и $E\{a_0\} = 2 \times 10^{-3}$ м (кривая *3*).

поскольку уже в момент ввода элемента в эксплуатацию вероятность его разрушения превышает предельно допустимую величину.

Если вместо экспоненциального распределения (3) величины a_0 аналогично тому, как это делалось в п. 2, использовать физически более корректное усеченное экспоненциальное распределение (7), то после аналогичных преобразований можно получить уточненное выражение для вероятности усталостного разрушения конструктивного элемента с трещиной

$$P_F(\tau_N) = \int\limits_{K_{Ic\min}}^{K_{Ic\max}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}S\{K_{Ic}\}} e^{-\frac{(K_{Ic}-E\{K_{Ic}\})^2}{2S\{K_{Ic}\}^2}} \times$$
$$\times\left(1 - \frac{1}{1-e^{-\frac{1}{E\{a_0\}}\delta}} + \frac{e^{-\frac{\left(\left(\frac{K_{IC}(1-R)}{f_k\Delta\sigma\sqrt{\pi}}\right)^{2-m} - NC\left(1-\frac{m}{2}\right)\left(\frac{f_k}{1-R}\Delta\sigma\sqrt{\pi}\right)^m\right)^{2/(2-m)}}{E\{a_0\}}}}{1-e^{-\frac{1}{E\{a_0\}}\delta}}\right)dK_{Ic}. \quad (16)$$

На рис. 6 представлены графики зависимости вероятности разрушения от величины математического ожидания глубины трещины, пропущенной в эксплуатацию после неразрушающего контроля $E\{a_0\}$, полученные для случаев экспоненциального и усеченного экспоненциального распределения величины a_0.

Так как оценки, полученные для случаев экспоненциального (15) и усеченного экспоненциального распределений (16), оказываются весьма близкими, в расчетах можно ориентироваться на более простую зависимость (15).

4. Сопоставление расчетной вероятности разрушения с величиной предельно-допустимой вероятности разрушения. Прочность и ресурс рассматриваемого элемента считаются обеспеченными, если расчетная величина вероятности разрушения P_F оказывается меньше предельно допустимой вероятности разрушения $[P_F]$: $P_F < [P_F]$.

Вопрос об обоснованном выборе величины предельно допустимой вероятности разрушения рассматриваемого элемента $[P_F]$ решается с учетом критичности данного

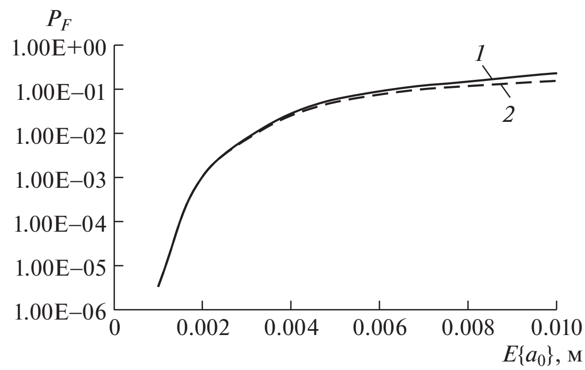

Рис. 6. Зависимости вероятности разрушения от уровня пропущенной в эксплуатацию дефектности: *1* – для экспоненциального распределения величины a_0; *2* – для усеченного экспоненциального распределения a_0.

элемента для обеспечения прочности и безопасности конструкции в целом, а также уровня социальной значимости самой конструкции и величины ущербов, возникающих в случае ее разрушения.

Вероятность разрушения системы в целом (P_{SF}) как вероятность сложного события определяется через произведение вероятности разрушения элемента (P_F) и условной вероятности разрушения системы в случае разрушения данного элемента ($P_{SF|F}$): $P_{SF} = P_F P_{SF|F}$.

Аналогичное условие можно записать для предельно допустимых вероятностей

$$[P_{SF}] = [P_F]P_{SF|F}. \tag{17}$$

Предельная величина вероятности разрушения конструкции в целом $[P_{SF}]$ устанавливается в зависимости от таких факторов как величина ущерба, который может наступить в случае разрушения системы, ее социальной значимости системы и срока эксплуатации [13, 14]. В частности, Международной научно-информационной ассоциацией строительной индустрии (CIRIA – Construction Industry Research and Information Association) для сложных инженерных сооружений (плотин, мостов, шельфовых платформ) принята формула для оценки величины предельно допустимой вероятности разрушения системы

$$[P_{SF}] = \frac{10^{-4}\xi_S t}{Lk_{HF}},$$

где t – расчетный срок эксплуатации системы; L – среднее количество людей, которые могут погибнуть в случае разрушения системы; k_{HF} – коэффициент, учитывающий разрушения, связанные с человеческим фактором (обычно принимают $k_{HF} = 10$); ξ_S – коэффициент социальной значимости системы (табл. 2). Таким образом, величина $[P_{SF}]$ обычно оказывается в диапазоне 1×10^{-5}–1×10^{-8}.

Условная вероятность разрушения системы в случае разрушения рассматриваемого элемента ($P_{SF|F}$) определяется с помощью графологических методов сценарной оценки (типа методов дерева событий, дерева отказов, байесовых сетей и др.). После чего из выражения (17) определяется предельно допустимая вероятность разрушения рассматриваемого элемента $[P_F]$, которая затем сопоставляется с расчетной вероятностью разрушения. Далее принимается решение относительно обеспеченности прочности и ресурса рассматриваемого конструктивного элемента.

Таблица 2. Коэффициент социальной значимости для различных типов технических систем [14]

Тип системы	ξ_S
Объекты массового скопления людей (спортивные комплексы, торговые центры)	0.005
Плотины	0.005
Жилые здания, офисные центры, промышленные объекты	0.05
Мосты	0.5
Буровые вышки, шельфовые установки	5

Заключение. Разработан метод оценки вероятности разрушения конструктивных элементов технических систем с постулируемой дефектностью. Метод позволяет учитывать различные виды развития трещин, такие как усталостное, коррозионное растрескивание под напряжением или замедленное деформационное коррозионное растрескивание через константы, входящие в уравнение Пэриса. Метод учитывает время эксплуатации, что позволяет определять оптимальную периодичность неразрушающего контроля.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гетман А.Ф., Козин Ю.Н.* Неразрушающий контроль и безопасность эксплуатации сосудов и трубопроводов давления. М.: Энергоатомиздат, 1997. 288 с.
2. *Гетман А.Ф.* Ресурс эксплуатации сосудов и трубопроводов АЭС. М.: Энергоатомиздат, 2000. 427 с.
3. *Кузьмин Д.А., Кузьмичевский А.Ю., Верташенок М.В.* Остаточная дефектность и вероятность существования дефектов с размером, превышающим допускаемое значение // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2020. Т. 16. № 5. С. 414.
4. BS 7910:2013. Guide to Methods of Assessing the Acceptability of Flaws in Metallic Structures, 3rd ed. BSI: London, UK, December 2013.
5. *Ржаницын А.Р.* Расчет сооружений с учетом пластических свойств металлов. М.: Стройиздат, 1979. 289 с.
6. *Ching J.* Equivalence between reliability and factor of safety // Probabilistic Engineering Mechanics. 2009. V. 24 (2). P. 159.
7. *Ang A., Tang. W.* Probability concepts in Engineering Planning and Design. V. 1. Basic Principles. John Wiley & Sons, Inc. US. 1975. V. 1. 407 p.
8. *Melchers R.* Structural Reliability Analysis and Prediction. 2nd Ed. John Wiley &Sons Ltd., England, 1999.
9. *Шатов М.М., Чернявский А.О.* Методика назначения предельной вероятности отказа // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2013. № 1. С. 51.
10. *Mori Y., Ellingwood B.E.* Reliability-based service-life assessment of aging concrete structures // J. Struct. Eng. 1993. V. 119 (5). P. 1600.
11. *Aghakouchak A.A., Stiemer S.F.* Fatigue reliability assessment of tubular joints of existing offshore structures // Can. J. Civ. Eng. 2001. V. 28. P. 691.
12. *Kong J.S., Frangopol D.M.* Life-cycle performance prediction of steel/concrete composite bridges // International Journal of Steel Structures. 2002. V. 2 (1). P. 13.
13. *Резников Д.О.* Соотношение между детерминистическим и вероятностным подходами к оценке конструкционной прочности технических систем // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2018. № 3. С. 61.
14. *Elishakoff I.* Safety Factors and Reliability: Friends or Foes Kluwer. Academic Publishers, Dordrecht, 2004. 295 p.
15. *Матвиенко Ю.Г.* Модели и критерии механики разрушения. М.: Физматлит, 2006. 328 с.