

В.Г. СЕБЕШЕВ¹, Е.К. ЛУКИН¹¹ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)»,
г. Новосибирск, Россия

НАДЕЖНОСТЬ И ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ТРУБЧАТЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ НЕРАВНОМЕРНЫХ КОРРОЗИОННЫХ ПОВРЕЖДЕНИЯХ

Аннотация. Современные подходы и требования к проектированию и экспертной оценке состояния зданий и сооружений предписывают определение количественных показателей их надежности. Этим обусловлена актуальность вопросов разработки методик расчетов надежности строительных систем с учетом их свойств и условий работы.

Коррозионные повреждения элементов металлических конструкций могут с течением времени приводить к утрате их работоспособности. Цель исследований, представленных в статье, – выявление и количественные описания изменения во времени характеристик надежности, по критерию прочности, первоначально центрально растягиваемого стального стержневого конструктивного элемента кольцевого сечения с учетом неравномерного коррозионного износа, вызывающего возникновение сложного сопротивления стержня – растяжения с изгибом. На основе предложенной пространственно-временной модели коррозии с использованием методов теории надежности построены расчетный аппарат и алгоритм определения надежности и долговечности элемента. Выполнены расчеты этих характеристик при варьировании стохастических свойств параметров геометрии сечения стержня, его напряженного состояния и модели коррозии при различных степенях агрессивности среды. Нагружение стержня моделировалось стационарной случайной функцией. Результаты расчетов надежности, вероятности отказа, коэффициента коррозии и временной плотности вероятности отказа представлены графиками зависимостей этих величин от времени.

Выполнены оценки влияния на надежность и долговечность конструктивного элемента основных расчетных характеристик стержня и модели коррозионных повреждений. Выявлен эффект значительного увеличения вероятности отказа и снижения долговечности при коррозионном износе, неравномерном по контуру сечения, в сравнении со случаем постоянной толщины слоя коррозии, при сопоставимых значениях коэффициентов коррозии.

Представленные в статье методика и результаты расчетов могут быть использованы для получения решений аналогичных задач в иных постановках (по форме сечения, модели коррозии, при нестационарных режимах нагружения и др.), а также для выполнения инженерных расчетов надежности при проектировании металлических конструкций.

Ключевые слова: надежность, долговечность, трубчатый стержень, неравномерная коррозия, сложное сопротивление, индекс надежности, вероятность отказа, коэффициент коррозии.

V.G. SEBESHEV¹, E.K. LUKIN¹¹Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Novosibirsk, Russia

RELIABILITY AND DURABILITY OF TUBULAR ELEMENTS OF STEEL STRUCTURES UNDER UNUNIFORM CORROSION DAMAGE

Abstract. Modern approaches and requirements for the design and expert assessment of the buildings and structures state require the quantitative determination of their reliability indicators. This determines the relevance of the development of methods for calculating the reliability of building systems, taking into account their properties and operating conditions.

Corrosion damage to elements of metal structures can lead to loss of their functionality over time. The purpose of the research presented in the article is to identify and quantitatively describe changes

over time in the reliability characteristics, according to the strength criterion, of an initially centrally tensile steel rod structural element of an annular section, taking into account uneven corrosive wear, which causes the occurrence of complex resistance of the rod, namely tension with bending. A calculation apparatus and an algorithm for determining the reliability and durability of an element were constructed using methods of reliability theory and the proposed spatio-time corrosion model. Calculations of these characteristics were carried out by varying the stochastic properties of the parameters of the rod's cross section geometry, its stress state and the corrosion model at various degrees of corrosion factor aggressiveness. The loading of the rod was modeled by a stationary random function. The results of calculations of reliability, failure probability, corrosion coefficient and time density of failure probability are presented in graphs of the dependences of these values on time.

The influence of the main design characteristics of the rod and the corrosion damage model on the reliability and durability of the structural element was assessed. The effect of a significant increase in the probability of failure and a decrease in durability with corrosion wear, uneven along the contour of the section, was revealed, in comparison with the case of a constant thickness of the corrosion layer, with comparable values of corrosion coefficients.

The methodology and calculation results presented in the article can be used to obtain solutions to similar problems in other formulations (by cross-sectional shape, corrosion model, under non-stationary loading conditions, etc.), as well as to perform engineering reliability calculations when designing metal structures.

Keywords: reliability, durability, tubular rod, ununiform corrosion, complex resistance, reliability index, probability of failure, corrosion coefficient.

Введение

Явление коррозии конструкционных материалов, в первую очередь стали, представляет собой существенную угрозу работоспособности элементов несущих систем зданий и сооружений. Изучению коррозии посвящены многочисленные исследования – как в отношении физико-химических особенностей процесса [1–7 и др.], так и в оценках влияния коррозионных повреждений на несущую способность конструкций [8–15 и др.]. Но современные требования обеспечения объективной оценки работоспособности сооружений и конструкций, их ресурса на разных этапах жизненного цикла и организации их обслуживания и ремонта, включая антикоррозионную защиту, определяют актуальность развития теории прямых вероятностных расчетов надежности и долговечности стальных строительных конструкций с учетом риска коррозии элементов в сложных условиях эксплуатации.

Цель исследования – решение прямой задачи расчета надежности и долговечности, по критерию прочности в упругой стадии работы материала, стального стержня кольцевого сечения, первоначально (до начала процесса коррозии) центрально растянутого, с учетом неравномерной внешней коррозии (см. рисунок 1), вследствие которой при сохранении исходного направления линии действия растягивающей силы в стержне (например, при его работе в составе фермы) возникает и увеличивается со временем эксцентриситет продольной силы и, соответственно, изгибающий момент в сечении. На рисунке 1 и далее в тексте символ $\tilde{\dots}$ обозначает случайную величину.

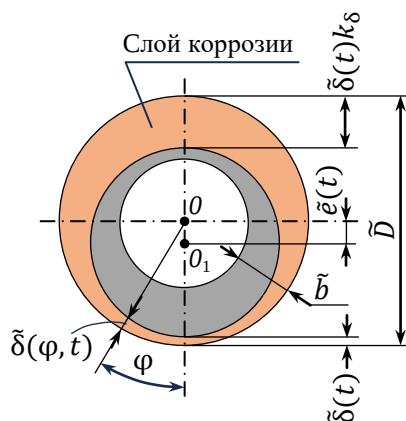


Рисунок 1 – Сечение стержня, пораженного коррозией
 $\tilde{D}$ и $\tilde{b}$ – исходные диаметр и толщина стенки трубы

Основные задачи:

- формирование рабочей модели стержня кольцевого сечения, испытывающего растяжение в исходном (проектном) состоянии и подвергающегося в процессе эксплуатации неравномерной наружной коррозии, инициирующей сложное сопротивление элемента – растяжение с изгибом;
- разработка методики расчета показателей надежности и долговечности конструктивного элемента, с учетом характеристик геометрии его сечения, вида напряженного состояния и параметров модели коррозии; получение количественных результатов;
- анализ и оценка влияния основных расчетных параметров, в том числе неравномерной коррозии, на надежность внецентренно растянутого стержня в сравнении со случаем равномерных по контуру сечения коррозионных повреждений.

Модели и методы

Постановка задачи расчета

Пространственно-временная стохастическая модель слоя металла, уничтоженного внешней коррозией (на рисунке 1 и в тексте для краткости используется термин «слой коррозии»), сформирована с использованием

а) формулы Гульдберга-Ваага [15] применительно к математическому ожиданию (МО) толщины слоя коррозии в точке $\varphi = 0$

$$\tilde{\delta}(t) = \delta_0(1 - e^{-\alpha t}) \quad (1)$$

(параметры δ_0 и α – по статистическим данным о процессах коррозии в различных условиях эксплуатации конструкций); зависимость (1) хорошо согласуется с результатами натурных наблюдений [1, 15];

б) предлагаемого авторами описания случайной толщины слоя:

$$\tilde{\delta}(\varphi, t) = \frac{1}{2} \left\{ \tilde{D} - \sqrt{[\tilde{D} - \tilde{z}(t) - 2\tilde{\delta}(t)]^2 - [\tilde{z}(t) \sin \varphi]^2} - \tilde{z}(t) \cos \varphi \right\}, \quad (2)$$

где $\tilde{z}(t) = \tilde{\delta}(t)(k_\delta - 1)$, что соответствует внутренней границе зоны коррозии в форме окружности диаметром $\tilde{D}(t) = \tilde{D} - \tilde{\delta}(t)(k_\delta + 1)$.

В (2) k_δ – коэффициент неравномерности толщины слоя коррозии (см. рисунок 1); $k_\delta \geq 0$.

Нагрузка, вызывающая внутренние силовые факторы в конструктивном элементе – стержне, представляется как стационарная случайная функция (рисунок 2 а), моделирующая усредненное вероятностное изменение расчетной нагрузки по годам (сезонам) эксплуатации (рисунок 2 б); возможный вариант – с завышением оценки вероятности отказа – по средним значениям частных максимумов (верхняя пунктирная линия на рисунке 2 б).

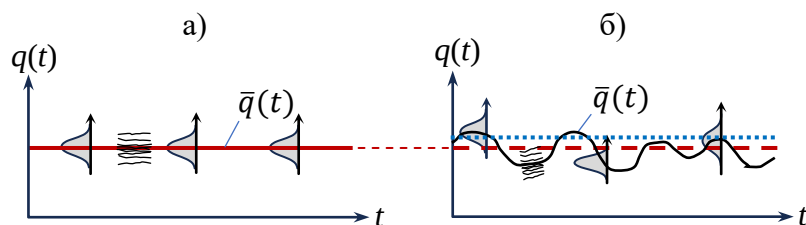


Рисунок 2 – Вероятностные временные модели нагрузки:
а) принятая в расчете, б) для реальных многолетних изменений
 $\bar{q}(t)$ – математическое ожидание нагрузки

Требуется установить зависимости от времени надежности/вероятности отказа, коэффициента коррозии и других стохастических характеристик состояния конструктивного элемента с использованием модели и исходных данных, описанных выше.

Решение

Применяя для расчета надежности метод проф. А.Р. Ржаницына [16–18], используем понятие резерва работоспособности:

$$\tilde{S}(t) = \tilde{R}(t) - \tilde{Q}(t), \quad (3)$$

где $\tilde{R}(t)$ и $\tilde{Q}(t)$ – соответственно обобщенная прочность (сопротивление, resistance) и нагрузочный фактор (load effect), в общем случае зависящие от времени t .

В данном решении входящая в (3) величина $\tilde{R}(t)$ – механическая характеристика материала (в соответствии с обозначенным выше прочностным условием предельного состояния – это предел упругости $\tilde{\sigma}_u(t)$), а роль $\tilde{Q}(t)$ играет наибольшее напряжение $\tilde{\sigma}(t)$ в расчетном сечении стержня, возникающее от заданных воздействий на конструкцию, в состав которой входит рассматриваемый элемент.

Надежность (вероятность безотказной работы по принятому критерию/условию работоспособности) находится как

$$P_s(t) = 1 - P_f(t), \quad (4)$$

где $P_f(t) = \int_{-\infty}^0 p_S[S(t)] dS$ – вероятность отказа;

$p_S[S(t)]$ – плотность вероятности резерва $\tilde{S}(t)$.

В предположении о нормальном распределении плотности $p_S[S(t)]$ вероятность отказа можно вычислять с помощью аппроксимации значений интеграла вероятности (функции Лапласа) [19], в частности, достаточно точной зависимостью [20]:

$$P_f(t) \approx 10^{-\{0,23[\beta(t)]^2 + 0,8\}}, \quad (5)$$

с предварительным определением $\beta(t)$ – индекса надежности (характеристики безопасности):

$$\beta(t) = \frac{\tilde{S}(t)}{\hat{S}(t)} = \frac{1}{A_S(t)} = \frac{1 - \xi(t)}{\sqrt{[A_R(t)]^2 + [\xi(t) A_Q(t)]^2 - 2\xi(t) r_{RQ}(t) A_Q(t) A_R(t)}}, \quad (6)$$

где $\tilde{S}(t)$, $\hat{S}(t)$ и $A_S(t)$ – соответственно математическое ожидание, стандарт и коэффициент вариации резерва $\tilde{S}(t)$;

$\xi(t) = \tilde{Q}(t)/\tilde{R}(t)$ – коэффициент нагруженности (приближения к расчетному предельному состоянию), $0 < \xi(t) < 1$;

$A_R(t)$, $A_Q(t)$, $r_{RQ}(t)$ – коэффициенты вариации (КВ) и корреляции случайных величин $\tilde{R}(t)$ и $\tilde{Q}(t)$.

МО и КВ сопротивления $\tilde{R}(t)$ здесь принимаются независимыми от времени ($\tilde{R}(t) = \bar{\sigma}_u(t) = \text{const}$, $A_R(t) = \text{const}$). Характеристику материала элемента $\bar{\sigma}_u(t)$ подбирают согласно ГОСТ 27772-2015 «Прокат для строительных стальных конструкций».

Случайная величина $\tilde{Q}(t) = \tilde{\sigma}(t)$ зависит от растягивающего усилия, являющегося, как и порождающая его нагрузка (см. выше), стационарной случайной функцией

$$\tilde{N}(t) = \pi \xi(0) \tilde{\sigma}_u \tilde{b} (\tilde{D} - \tilde{b}) \quad (7)$$

с инвариантным времени математическим ожиданием $\bar{N}(t) = \text{const} = \pi \xi(0) \bar{\sigma}_u \bar{b} (\bar{D} - \bar{b})$,

где $\xi(0)$ – начальный (при $t = 0$) коэффициент нагруженности (этим параметром опосредованно задается МО нагрузки – $\bar{q}(t)$).

Необходимые для определения напряжения $\tilde{\sigma}(t)$ геометрические характеристики работоспособной (не корродировавшей) части сечения в момент времени t :

– эффективная площадь:

$$\tilde{A}(t) = \pi \left\{ \tilde{b} (\tilde{D} - \tilde{b}) - \tilde{\sigma}(t) (1 + k_\delta) \left[\frac{\tilde{D}}{2} - \frac{\tilde{\sigma}(t)}{4} (1 + k_\delta) \right] \right\}; \quad (8)$$

– эксцентриситет как результат неравномерной коррозии (расстояние между центрами O и O_1 исходного и ослабленного сечений – см. рисунок 1):

$$\tilde{e}(t) = \frac{\tilde{D}(t)}{2} - \tilde{\delta}(t) - \tilde{y}_c(t), \quad (9)$$

где $\tilde{y}_c(t) = \frac{\tilde{D}(t)}{2} + \frac{\tilde{A}_d}{\tilde{A}(t)} \tilde{\delta}(t)$ - расстояние от центра тяжести эффективной части сечения до нижней (при $k_\delta > 1$) точки внутренней границы слоя коррозии;

$\tilde{A}_d = \frac{\pi}{4} (\tilde{D} - 2\tilde{b})^2$ - площадь сечения отверстия трубы;

- момент сопротивления ослабленного сечения:

$$\tilde{W}(t) = \frac{\tilde{I}(t)}{\tilde{y}_{max}(t)} = \frac{\frac{\pi}{64} \{ [\tilde{D}(t)]^4 - (\tilde{D} - 2\tilde{b})^4 \} - \tilde{A}_d [\tilde{e}(t)]^2}{\frac{\tilde{D}}{2} + \tilde{e}(t) - \tilde{\delta}(t) k_\delta}. \quad (10)$$

Напряжение в расчетной точке сечения трубчатого стержневого элемента, поврежденного коррозией, при внецентренном растяжении:

$$\tilde{\sigma}(t) = \tilde{\sigma}_N(t) + \tilde{\sigma}_M(t) = \frac{\tilde{N}}{\tilde{A}(t)} \left[1 + \frac{\tilde{A}(t) \tilde{e}(t)}{\tilde{W}(t)} \right]. \quad (11)$$

Коэффициент вариации $A_Q(t) \equiv A_\sigma(t)$ вычисляется через вероятностные характеристики напряжения: $A_\sigma(t) = \hat{\sigma}(t) / \bar{\sigma}(t)$, где стандарт $\hat{\sigma}(t)$ и МО $\bar{\sigma}(t)$ определяются методом статистической линеаризации [16, 17]:

$$[\hat{\sigma}(t)]^2 = \sum_{i=1}^n \left[\frac{\partial \sigma(\{X(t)\})}{\partial x_i(t)} \bigg|_{\{X(t)\}=\{\bar{X}(t)\}} \hat{x}_i(t) \right]^2; \quad \bar{\sigma}(t) = \sigma(\{\bar{X}(t)\}). \quad (12)$$

В (12) вектор случайных параметров $\{\tilde{X}(t)\} = \{\tilde{x}_1 \tilde{x}_2 \tilde{x}_3 \tilde{x}_4\} = \{\tilde{\sigma}_u \tilde{D} \tilde{b} \tilde{\delta}(t)\}$. Его элементы задаются математическими ожиданиями $\{\bar{X}(t)\} = \{\bar{\sigma}_u \bar{D} \bar{b} \bar{\delta}(t)\}$ и стандартами $\{\hat{X}(t)\} = \{\hat{\sigma}_u \hat{D} \hat{b} \hat{\delta}(t)\}$.

По алгоритму, реализующему вышеизложенную методику и расчетный аппарат, включающий зависимости и формулы (4) – (12), выполнены вычисления показателей надежности $\beta(t)$, $P_f(t)$ и $P_s(t)$ при варьировании времени t как параметра. Дополнительно определялся коэффициент, традиционно используемый в инженерных оценках эффекта коррозии:

$$k_{кор}(t) = \bar{A}_{кор}(t) / \bar{A}_0,$$

где $\bar{A}_{кор}(t)$ – МО площади сечения слоя коррозии; $\bar{A}_0$ – МО начальной площади сечения.

Результаты исследования и их анализ

Исходные данные, одинаковые для всех представленных далее разных комбинаций расчетных параметров:

а) $\bar{\sigma}_u = 245$ МПа; $A_{\sigma_u} = 0,06$; $A_D = 0,005$; $A_b = 0,01$; $A_{\delta(t)} = 0,1$; $\xi(0) = 0,7$;

б) параметры модели коррозии (1):

- для сильноагрессивной среды, при начальной скорости коррозии 0,15 мм/год (или среднеагрессивной при относительной влажности более 75 %) [21] –

$$\delta_0 = 0,25 \text{ см}; \alpha = 0,06 \text{ год}^{-1}, \text{ тогда } \bar{\delta}_{cul}(t) = 0,25(1 - e^{-0,06t});$$

- для слабоагрессивной среды, при начальной скорости 0,05 мм/год –

$$\delta_0 = 0,0833 \text{ см}; \alpha = 0,06 \text{ год}^{-1}; \bar{\delta}_{cul}(t) = 0,0833(1 - e^{-0,06t}).$$

Первая комбинация расчетных параметров – начальные геометрические характеристики сечения одинаковые – $\bar{D} = 14$ см, $\bar{b} = 1$ см; варьируется форма слоя коррозии за счет факторов конструктивного и эксплуатационного характера; воздействие окружающей среды на стержень – сильноагрессивное:

- вариант 1: равномерная коррозия ($k_\delta = 1$);

- вариант 2: неравномерная коррозия – сверху больше, чем снизу, разница в толщинах по контуру сечения небольшая ($k_\delta = 1,1$);

– вариант 3: неравномерная коррозия – сверху меньше, чем снизу, значительная разница в толщинах ($k_\delta = 1/3$).

Вариант 3 можно интерпретировать также как случай слабоагрессивной среды, но с эксплуатационным усилением коррозии снизу, например, из-за конденсата, стекающего вниз при горизонтальной ориентации стержня.

Результаты расчетов представлены на рисунке 3 в виде графиков зависимостей от времени надежности $P_s(t)$, вероятности отказа $P_f(t)$, индекса надежности $\beta(t)$ и коэффициента коррозии $k_{кор}(t)$.

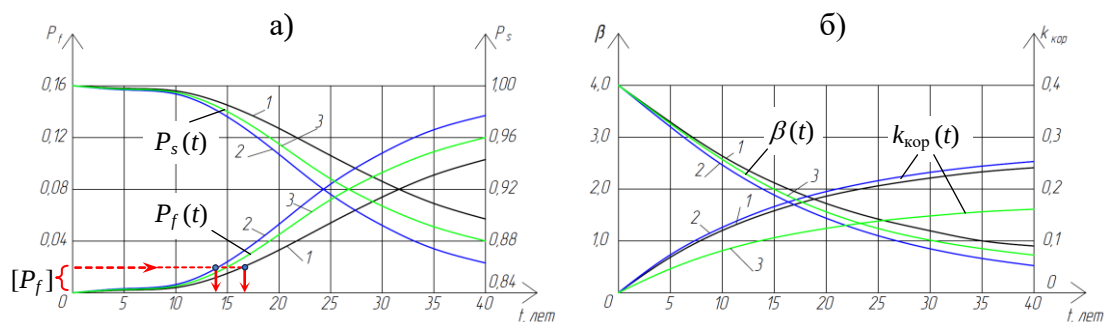


Рисунок 3 – Изменение во времени показателей надежности элемента при $\bar{D}/\bar{b} = 14$ и различных параметрах слоя коррозии (по вариантам 1, 2, 3) в случае сильноагрессивной среды:
а) вероятность отказа $P_f(t)$ и надежность $P_s(t)$;
б) индекс надежности $\beta(t)$ и коэффициент коррозии $k_{кор}(t)$

Анализ полученных данных позволяет отметить следующее:

– лучшие из всех показатели надежности дает вариант 1, в котором даже при достаточно высоком коэффициенте коррозии, сопоставимом с вариантом 2 (рисунок 3 б), напряженное состояние стержня – наиболее благоприятное ввиду отсутствия изгиба;

– для срока эксплуатации $t = 40$ лет в варианте 2 коэффициент коррозии на 5 % больше, чем в варианте 1 (из-за $k_\delta = 1,1$), а вероятность отказа на 33 % выше за счет реализующегося сложного сопротивления элемента – его внецентренного растяжения вследствие неравномерной коррозии;

– в варианте 3 наименьшие коррозионные потери металла – на 33 % меньше, чем в варианте 1, но при этом вероятность отказа на 16,5 % больше, так как сильная неравномерность слоя коррозии приводит к значительному увеличению со временем эксцентриситета продольной силы и возрастанию влияния изгиба элемента на напряжения в его сечениях.

Вторая комбинация расчетных параметров – при одном и том же типе воздействия окружающей среды (сильноагрессивном) и форме слоя коррозии со значительной неравномерностью толщины ($k_\delta = 1/3$) варьируются начальные геометрические характеристики сечения (относительная – $\bar{D}/\bar{b}$ и абсолютная $\bar{b}$):

- вариант 4: $\bar{D} = 28$ см, $\bar{b} = 1$ см ($\bar{D}/\bar{b} = 28$);
- вариант 5: $\bar{D} = 28$ см, $\bar{b} = 2$ см ($\bar{D}/\bar{b} = 14$).

Выявленные расчетом для второй комбинации параметров зависимости от времени величин $P_s(t)$, $P_f(t)$, $\beta(t)$ и $k_{кор}(t)$ изображены графически на рисунке 4. Там же для сравнения показан график для варианта 3 с такими же, как в вариантах 4 и 5, значениями k_δ и проектной толщины стенки трубы $\bar{b} = 1$ см.

Замечание: сопоставительные оценки надежности для элементов с разными относительными и абсолютными характеристиками геометрии сечений предполагают одинаковый показатель приближения к предельному состоянию $\gamma_0(0)$ (то есть при соответствующих разных значениях продольных сил).

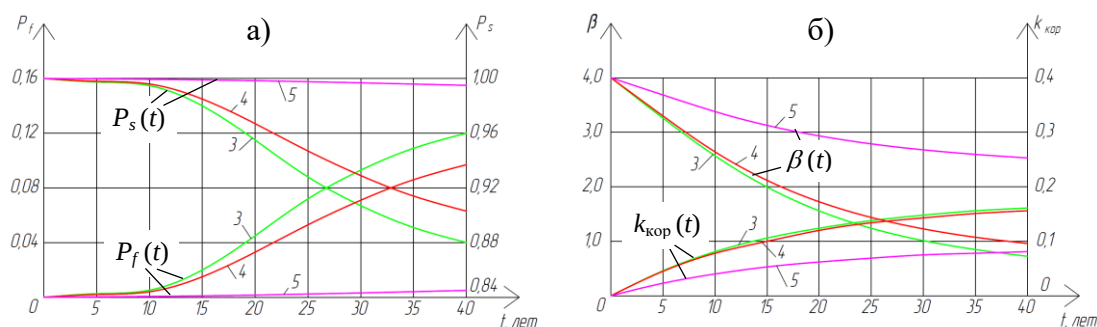


Рисунок 4 – Изменение во времени характеристик надежности элемента при различных параметрах геометрии сечения ($\bar{D}$ и $\bar{b}$) и одинаковых условиях коррозии:
 а) вероятность отказа $P_f(t)$ и надежность $P_s(t)$;
 б) индекс надежности $\beta(t)$ и коэффициент коррозии $k_{kop}(t)$

Сравнение результатов расчетов, показанных на рисунке 4 для вариантов 4 и 5, выявляет доминирующее влияние на надежность толщины стенки в реальном измерении (1 см и 2 см соответственно): коэффициенты коррозии к моменту $t = 40$ лет отличаются в 2 раза, а вероятности отказа в 22 раза. Отношение исходных размеров $\bar{D}/\bar{b}$ также имеет значение: его увеличение при фиксированном $\bar{b}$ повышает надежность, но в меньшей мере, чем увеличение толщины стенки трубы. Например, в вариантах 4 и 3 при прочих равных параметрах двойная разница диаметров (28 см и 14 см) несколько уменьшает коэффициент коррозии (на 3 %) для большего сечения, но вероятность отказа при удвоении расхода материала снижается лишь на 19 %. Тем не менее, этот положительный эффект (согласно замечанию – при почти вдвое большей, чем в варианте 3, продольной силе) имеет место и объясняется уменьшением влияния изгиба, вызванного неравномерной коррозией, с увеличением габарита сечения (в формуле (11) знаменатель отношения $\tilde{A}(t)/\tilde{W}(t)$ при этом растет быстрее числителя).

Используя результаты вычисления вероятности отказа $P_f(t)$, можно определять долговечность конструктивного элемента как продолжительность периода эксплуатации до момента достижения предельно допустимого значения $[P_f]$ (рисунок 3 а). При $[P_f] = 0,02$ для вариантов 1 и 2 расчетная долговечность $T([P_f])$ получается равной соответственно 17 и 14 годам.

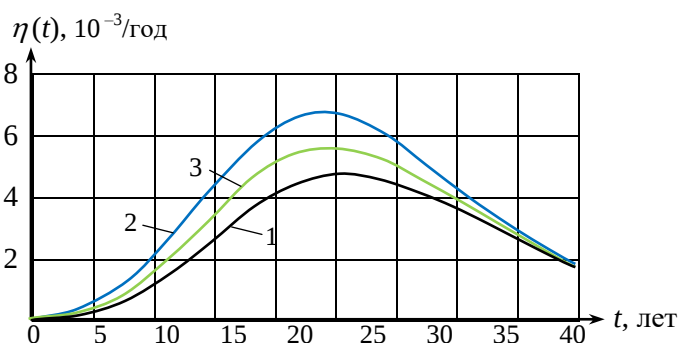


Рисунок 5 – Временная плотность вероятности отказа

Информативным индикатором надежности, кроме $P_s(t)$ и $P_f(t)$, является временная плотность вероятности отказа

$$\eta(t) = -\frac{d}{dt} \ln [P_f(t)] -$$

показатель, характеризующий скорость (нарастающую или убывающую) изменения со временем риска возникновения отказа.

На рисунке 5 – графики $\eta(t)$ для комбинаций расчетных параметров по вариантам 1, 2, 3. С высокой достоверностью по критериям χ^2 и Колмогорова – Смирнова они могут моделироваться распределениями типов Beta, Logistic и Normal.

Представленные выше методика и расчетный аппарат позволяют получить как частный случай при $k_\delta = 1$ решение задачи, рассмотренной в [22].

В выполненных расчетах показателей надежности не учитывается эффект продольно-поперечного изгиба при внецентренном растяжении стержня, претерпевающего неравномерный коррозионный износ – это либо не сказывается на оценке вероятности отказа, либо в некоторых случаях может давать ее завышение (в запас надежности).

Для сжатых стержней необходимо кроме прочности (при наличии конструктивных ослаблений сечений) учитывать требования устойчивости. При этом в случае возникновения, из-за коррозии, продольно-поперечного изгиба должна рассматриваться задача потери устойчивости 2-го рода, а риск бифуркационной потери устойчивости (1-го рода) может игнорироваться.

Выводы

1. Разработаны методика и алгоритм расчета надежности и долговечности по критерию прочности внецентренно растянутых стержней, претерпевающих неравномерный коррозионный износ; с их помощью получены количественные описания зависимостей от времени вероятности отказа и других значимых характеристик состояния стальных стержней кольцевого сечения при различных параметрах пространственно-временной модели процесса коррозии и варьировании геометрии кольца.

2. Сравнительный анализ особенностей изменения во времени показателей надежности трубчатого конструктивного элемента при разных видах коррозии (равномерной и неравномерной) выявил сильную зависимость этих показателей от формы сечения слоя коррозионных повреждений.

3. Полученные в работе результаты могут быть использованы для приближенных оценок надежности и долговечности стальных стержневых элементов, испытывающих коррозию (равномерную и неравномерную), при совместном изгибе с растяжением (или сжатием, без учета риска потери устойчивости), а также имеющих тонкостенные коробчатые, двутавровые и т.п. сечения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Розенфельд И.Л. Атмосферная коррозия металлов. М.: Изд-во АН СССР, 1980. 250 с.
2. Каблов Е.Н., Старцев О.В. Фундаментальные и прикладные исследования коррозии и старения материалов в климатических условиях (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 4(37). С. 38–52. doi:10.18577/2071-9140-2015-0-4-38-52.
3. Uhlig H.N., Revie R.W. Corrosion and Corrosion Control: An Introduction to Corrosion Science and Engineering. John Wiley & Sons, Inc., 1985. 441 p.
4. Козлов В.Г., Титова И.В., Коноплин А.Н., Булыгин Н.Н. Методы борьбы с коррозией металлов // Фундаментальные исследования. 2017. № 6. С. 53–57.
5. Виноградов С.С., Никифоров А.А., Демин С.А., Чесноков Д. В. Защита от коррозии углеродистых сталей // Авиационные материалы и технологии. 2017. № 8. С. 242–263. doi:10.18577/2071-9140-2017-0-S-242-263.
6. Черепашкин С.Е., Латыпов О.Р., Кравцов В.В. Методы исследования коррозии оборудования нефтегазового комплекса. Уфа: ООО "Изд-во науч.-техн. литературы "Монография", 2016. 104 с.
7. Голдобина Л. А. Анализ причин коррозионных разрушений подземных трубопроводов и новые решения повышения стойкости стали к коррозии // Записки Горного института. 2016. Т. 219. С. 459–464.
8. O'Grady II T.J., Hissey D.T., Kiefner J.F. Pressure Calculation for Corroded Pipe Development // Oil & Gas Journal. 1992. Oct. 19. Pp. 84–89.
9. Ибрагимов А.А., Подорожников С.Ю., Шабаров А.Б. Расчетная модель и алгоритм определения остаточного ресурса трубопровода в условиях периодических изменений напряжений и коррозии // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2014. № 4. С. 199–206.
10. Антонов А.В., Острейковский В.А. Ресурс и срок службы оборудования энергоблоков атомных станций. М.: Инновационное машиностроение, 2017. 536 с.

11. Вольберг Ю.Л., Коряков А.С. Учет воздействия агрессивной среды на несущую способность стальных конструкций // Труды МИСИ, 1983. № 183. С. 30–31.
12. Гладштейн Л.И., Лактюшин В.С. Применение атмосферостойких сталей без защитных покрытий в строительных конструкциях. Госстрой СССР. Центральный институт научной информации по строительству и архитектуре, 1979. Вып. 6. 53 с.
13. Голубев А.И. Влияние коррозии металлов на долговечность металлических конструкций // Исследования надежности металлических конструкций: Труды ЦНИИПроектстальконструкция, 1979. С. 85–94.
14. Лашенко М.Н. Повышение надежности металлических конструкций зданий и сооружений при реконструкции. Ленинград: Стройиздат, 1987. 134 с.
15. Бондаренко В.М., Прохоров В.Н. К вопросу об оценке силового сопротивления железобетона повреждению коррозионными воздействиями // Изв. вузов. Строительство, 1998. № 3. С. 30–41.
16. Ржаницын А.Р. Теория расчёта строительных конструкций на надёжность. М.: Стройиздат, 1978. 239 с.
17. Raizer V. Reliability of Structures. Analysis and Applications. Backbone Publishing Company (USA). 2009. 146 p.
18. Ведяков И.И., Райзер В.Д. Надежность строительных конструкций. Теория и расчет: Научное издание. М.: Изд-во АСВ, 2018. 414 с.
19. Vrouwenvelder T. Treatment of risk and reliability in the Euro-codes. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Structures and Buildings. 2008. Volume 161, issue SB4 (August). Pp. 209–214.
20. Себешев В.Г. Расчеты надежности сооружений и конструкций по поликритериальным и обобщенным условиям безотказности // Известия Петербургского университета путей сообщения, 2017. Т. 14. № 1. С. 165–174.
21. Бирюлев В.В., Кошин И.И., Крылов И.И., Сильвестров А.В. Проектирование металлических конструкций. Спец. курс. Учеб. пособие для вузов. Ленинград: Стройиздат, 1990. 432 с.
22. Себешев В.Г. Надежность и долговечность растянутых элементов стержневых конструкций при коррозионных повреждениях // Изв. вузов. Строительство. 2006. № 11–12. С. 100–107.

REFERENCES

1. Rozenfeld I.L. Atmosfernaya korroziya metallov [Atmospheric corrosion of metals]. Moscow: Izdatel'stvo AN SSSR [Publishing house of the USSR Academia of Sciences]. 1980. 250 p. (rus).
2. Kablov E.N., Startsev O.V. Fundamental'nyye i prikladnyye issledovaniya korrozii i stareniya materialov v klimaticheskikh usloviyakh (obzor) [Fundamental and applied researches on corrosion and aging of materials under climatic conditions (review)]. Aviatsonnyye materialy i tekhnologii [Aviation materials and technologies]. 2015. No. 4(37). Pp. 38–52. doi:10.18577/2071-9140-2015-0-4-38-52. (rus).
3. Uhlig H.H., Revie R.W. Corrosion and Corrosion Control: An Introduction to Corrosion Science and Engineering. John Wiley & Sons, Inc., 1985. 441 p.
4. Kozlov V.G., Titova I.V., Konoplin A.N., Bulygin N.N. Metody bor'by s korroziyey metallov [Methods of combating metals' corrosion]. Fundamental'nyye issledovaniya [Fundamental researches]. 2017. No. 6. Pp. 53–57. (rus).
5. Vinogradov S.S., Nikiforov A.A., Dyomin S.A., Chesnokov D.V. Zashchita ot korrozii uglerodistykh staley [Corrosion protection for carbon steels]. Aviatsonnyye materialy i tekhnologii [Aviation materials and technologies]. 2017. No. 8. Pp. 242–263. doi:10.18577/2071-9140-2017-0-S-242-263. (rus).
6. Cherepashkin S.E., Latypov O.R., Kravtsov V.V. Metody issledovaniya korrozii oborudovaniya neftegazovogo kompleksa [Methods for studying corrosion of equipment in oil and gas complex]. Ufa: OOO "Izdatel'stvo nauchno-tekhnicheskoy literatury "Monografiya" [Publishing house of scientific and technical literature "Monograph", Ltd.]. 2016. 104 с.
7. Goldobina L.A. Analiz prichin korroziyonnykh razrusheniy podzemnykh truboprovodov i novyye resheniya povysheniya stoykosti stali k korrozii [Analysis of the causes of corrosion damage in underground pipelines and new solutions to improve the resistance of steel to corrosion]. Zapiski Gornogo instituta [Notes of the Mining Institute]. 2016. Vol. 219. Pp. 459–464. (rus).
8. O'Grady II T.J., Hissey D.T., Kiefner J.F. Pressure Calculation for Corroded Pipe Development // Oil & Gas Journal. 1992. Oct. 19. Pp. 84–89.
9. Ibragimov A.A., Podorozhnikov S.Yu., Shabarov A.B. Raschetnaya model' i algoritm opredeleniya ostatochnogo resursa truboprovoda v usloviyakh periodicheskikh izmeneniy napryazheniy i korrozii [Calculation model and algorithm for determining the residual life of the pipeline under conditions of periodic changing stresses and corrosion]. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) [Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)]. 2014. No. 84. Pp. 199–206. (rus).
10. Antonov A.V., Ostreykovskiy V.A. Resurs i srok sluzhby oborudovaniya energoblokov atomnykh stantsiy [Resource and service life of the power units' equipment of nuclear power plants]. Moscow: Innovatsionnoye mashinostroeniye [Innovative engineering]. 2017. 536 p. (rus).
11. Vol'berg Yu.L., Korjakov A.S. Uchët vozdeystviya agressivnoy sredy na nesushchuyu sposobnost' stal'nykh konstruktсий [Taking into consideration the impact of an aggressive environment on the bearing capacity of steel structures]. Trudy MISI [Proceedings of Moscow Institute of Civil Engineering]. 1983. No. 183. Pp. 30–31. (rus).

12. Gladshteyn L.I., Laktyushin V.S. Primeneniye atmosferostoykikh staley bez zashchitnykh pokrytiy v stroitel'nykh konstruktsiyah [The use of atmospheric-resistant steels without protective coatings in building structures]. Gosstroy SSSR. Tsentral'nyy institut nauchnoy informatsii po stroitel'stvu i arkhitekture [Gosstroy of the USSR. Central Institute of Scientific Information on Construction and Architecture]. 1979. Iss. 6. 53 p. (rus).
13. Golubev A.I. Vliyaniye korrozii metallov na dolgovechnost' metallicheskih konstruktсий [Influence of metal corrosion on the durability of metal structures]. Issledovaniya nadëzhnosti metallicheskih konstruktсий. Trudy CNIIProektstal'konstruktсиya [Reliability studies of metal structures: Proceedings of the Central Research Institute of Projectsteelconstruction]. 1979. Pp. 85–94. (rus).
14. Lashchenko M.N. Povysheniye nadëzhnosti metallicheskih konstruktсий zdaniy i sooruzheniy pri rekonstruktsii [Increase the reliability of metal structures of buildings and structures during reconstruction]. Leningrad: Stroyizdat. 1987. 134 p. (rus).
15. Bondarenko V.M., Prokhorov V.N. K voprosu ob otsenke silovogo soprotivleniya zhelezobetona povrezhdeniyu korrozionnymy vozdeystviyamy [On the issue of assessing the force resistance of reinforced concrete to damage by corrosion]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 1998. No. 3. Pp. 30–41. (rus).
16. Rzhantsyn A.R. Teoriya raschëta stroitel'nykh konstruktсий na nadëzhnost' [The theory of building structures' reliability analysis]. Moscow: Stroyizdat. 1978. 239 p. (rus).
17. Raizer V. Reliability of Structures. Analysis and Applications. Backbone Publishing Company (USA). 2009. 146 p.
18. Vedyakov I.I., Raizer V.D. Nadëzhnost' stroitel'nykh konstruktсий. Teoriya i raschët: Nauchnoye izdaniye [Reliability of constructional structures. Theory and analysis: Scientific publication]. Moscow: Izdatel'stvo ASV [Publishing office of the Association of Construction Higher Educational Institutions]. 2018. 414 p. (rus).
19. Vrouwenvelder T. Treatment of risk and reliability in the Euro-codes. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Structures and Buildings. 2008. Vol. 161, issue SB4 (August). Pp. 209–214.
20. Sebeshev V.G. Raschëty nadëzhnosti sooruzheniy i konstruktсий po polikriterial'nyy i obobshchënnym usloviyam bezotkaznosti [Analysis of the reliability of buildings and structures according to polycriteria and generalized conditions of serviceability]. Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya [Proceedings of the Petersburg State Transport University]. 2017. Vol. 14. No. 1. Pp. 165–174. (rus).
21. Biryulyov V.V., Koshin I.I., Krylov I.I., Sil'vestrov A.V. Proektirovaniye metallicheskih konstruktсий. Spetsial. kurs. Uchebn. posobiye dlya vuzov [Design of metal structures. Special course. Textbook for universities]. Leningrad: Stroyizdat. 1990. 432 p. (rus).
22. Sebeshev V.G. Nadëzhnost' i dolgovechnost' rastyanytykh elementov sterzhnevyykh konstruktсий pri korrozionnykh povrezhdeniyakh [Reliability and durability of tensioned elements of bar structures in case of corrosion damage]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2006. No. 11–12. Pp. 100–107. (rus).

Информация об авторах:

Себешев Владимир Григорьевич

ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)»,
г. Новосибирск, Россия,
кандидат технических наук, профессор, почетный член РААСН, профессор кафедры строительной механики.
E-mail: sebeshev@sibstrin.ru

Лукин Егор Константинович

ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)»,
г. Новосибирск, Россия,
студент Института строительства.
E-mail: e.lukin@sibstrin.ru

Information about authors:

Sebeshev Vladimir G.

Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Novosibirsk, Russia,
candidate of technical science, professor, honorary member of the RAACS, professor of the department of structural mechanics.
E-mail: sebeshev@sibstrin.ru

Lukin Egor K.

Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Novosibirsk, Russia,
student of the Institute of Construction.
E-mail: e.lukin@sibstrin.ru