

Т.А. МАЦЕЕВИЧ¹, С.А. ДАНКОВ¹¹ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», г. Москва, Россия

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ФЕРМЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ КОРРОЗИОННОМ ИЗНОСЕ НА ОСНОВЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Аннотация. В работе рассмотрена задача вероятностной оценки надежности ферменных металлических конструкций с учетом коррозионного износа. Коррозионный износ представляется как накопление повреждений, а коррозионное состояние элемента рассматривается от неповрежденного уровня до предельного, соответствующего отказу (потери устойчивости стержневого элемента ферменной конструкции). Деграция описывается последовательностью вероятностных переходов между состояниями в рамках марковской модели с непрерывным временем. Временные зависимости вероятностей перехода восстанавливаются по экспериментальным наблюдениям и аппроксимируются параметрическими зависимостями, что позволяет сформировать согласованную матрицу переходов во времени для всей шкалы состояний. После калибровки модели выполняется моделирование методом Монте-Карло для отдельного стержневого элемента ферменной конструкции и для ферменной системы в целом с учетом различной структурной значимости элементов. Получены оценки надежности, а также характеристики накопления повреждений, которые можно использовать для инженерной диагностики и обоснования ремонтных решений.

Ключевые слова: коррозионный износ, ферменные конструкции, надежность, цепи Маркова, матрица вероятностей переходных состояний, метод Монте-Карло, имитационное моделирование.

T.A. MATSEEVICH¹, S.A. DANKOV¹¹National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

ASSESSMENT OF THE RELIABILITY OF TRUSSES IN CASE OF CORROSIONAL WEAR BASED ON SIMULATION MODELING

Abstract. The paper considers the problem of probabilistic assessment of the reliability of truss metal structures, taking into account corrosion wear. Corrosion wear is represented as the accumulation of damage, and the corrosion state of an element is considered from the undamaged level to the limit state corresponding to failure (loss of stability of a rod element of a truss structure). Degradation is described by a sequence of probabilistic transitions between states within a continuous-time Markov model. The time dependencies of the transition probabilities are reconstructed from experimental observations and approximated by parametric dependencies, which allows us to form a consistent time transition matrix for the entire state scale. After the model is calibrated, Monte Carlo simulations are performed for individual rod elements of the truss structure and for the truss system as a whole, taking into account the varying structural significance of the elements. This allows us to obtain reliability estimates and damage accumulation characteristics, which can be used for engineering diagnostics and repair decision-making.

Keywords: corrosion-induced deterioration, truss structures, reliability assessment, Markov chains, matrix of probabilities of transition states, Monte Carlo method, simulation modeling.

1. Введение

Коррозионный износ стальных ферменных конструкций можно рассматривать как длительный процесс накопления повреждений, при котором постепенно уменьшается эффективное сечение стержней и растёт неопределённость в отношении их фактической несущей способности. На практике это приводит к тому, что оценка надёжности становится задачей не только прочностной, но и вероятностной: коррозия одновременно снижает сопротивление и увеличивает разброс характеристик, поэтому «запас» работоспособности со временем меняется неодинаково для разных элементов и условий эксплуатации [1–4]. Дополнительную сложность создаёт то, что ферма является системой, где роль отдельных стержней различна, а локальные повреждения способны по-разному влиять на общую работоспособность. Сформирован широкий набор вероятностных моделей коррозии и подходов к учёту неопределённости в расчётах надёжности стальных конструкций [5–9]. Отдельно подчёркивается значимость корректного описания статистической природы коррозионных дефектов и выбора модели деградации, поскольку это влияет на временные профили надёжности и выводы о ресурсе [8, 9]. Для атмосферной коррозии накоплены длительные наблюдения и предложены обобщённые зависимости, связывающие коррозионные потери с параметрами среды [10–12], а для мостовых металлических сооружений обобщены современные представления о развитии коррозии, продуктах коррозии и технологиях очистки, влияющих на несущую способность и эксплуатационные последствия [13]. В задачах дискретного описания состояния сооружений применяются марковские модели и близкие стохастические процессы: они позволяют описывать деградацию как последовательность переходов между состояниями и строить прогнозы на горизонте жизненного цикла [14]. Для стальных ферм и мостов интерес представляют работы, где марковский аппарат используется уже на уровне планирования обслуживания и оценки системных эффектов [15], а также исследования, ориентированные на временной анализ ферменных систем в условиях атмосферной коррозии [16]. Тем не менее сохраняется методический разрыв между эмпирическими данными о деградации и полной, согласованной во времени вероятностной моделью переходов между стадиями коррозии, которая была бы пригодна и для отдельного стержневого элемента ферменной конструкции, и для ферменной системы [17–22]. Поэтому цель исследования состоит в разработке вероятностной методики оценки надёжности ферм при коррозионном износе на основе марковского описания переходов между состояниями и имитационного моделирования. Для достижения цели решаются задачи идентификации временных зависимостей переходных вероятностей по экспериментальным данным, построения полной матрицы переходов во времени и расчёта показателей надёжности методом Монте-Карло для стержневого элемента ферменной конструкции и для всей системы с учётом различной структурной значимости стержней.

2. Модели и метод

В качестве исходных материалов использованы эмпирические временные зависимости для шести дискретных коррозионных состояний стального стержневого элемента. Данные представлены в виде пар «время t – вероятность $p(t)$ » и сведены в excel-файл, где $p_{1j}(t)$ задают экспериментальные кривые для исходного состояния S_1 (элемент без коррозионных повреждений) и последующих состояний $S_2 \dots S_6$. Эти кривые рассматриваются как наблюдаемое «ядро» вероятностной деградации, по которому описываются параметрические зависимости, а затем формируется полная матрица нестационарных переходных вероятностей $P(t)$ для всех состояний.

Детерминированная часть модели используется для физического обоснования дискретизации и связи «потеря металла → потеря устойчивости». Коррозионное воздействие определяется через глубину проникновения (или эквивалентную потерю толщины) $C_{(t)}$. В простейшем кинетическом приближении используется степенная зависимость

$$C_{(t)} = At^B, \quad (1)$$

где $C_{(t)}$ — концентрация продуктов коррозии или глубина проникновения,

A и B — два фактора, определяемые условиями окружающей среды.

Эта кинетическая модель позволяет прогнозировать развитие коррозии во времени.

В работе [23] был предложен метод моделирования коррозии.

Модель рассматривает два случая:

- начальное, незатронутое коррозией сечение A_0 ;
- сечение $A_s(t)$, уменьшающееся во времени по формуле (2).

Площадь поперечного сечения элемента $A_s(t)$ с круглым сечением с течением времени оценивается по следующей формуле:

$$A_s(t) = \begin{cases} \frac{\pi d_{st0}^2}{4} \\ \frac{\pi [d_{st0} - r_{corr}(t - T_{corr})]^2}{4} \end{cases} \quad (2)$$

где t — текущее время;

T_{corr} — время начала коррозии, которое рассчитывается по формуле (3);

d_{st0} — начальный диаметр (до начала коррозии);

r_{corr} — скорость коррозии.

Время коррозии, необходимое для начала активной коррозии, определяется по следующей формуле, основанной на законах диффузии:

$$T_{corr} = \frac{x^2}{4D \left(\operatorname{erfc}^{-1} \left(\frac{C_{th}}{C_0} \right) \right)^2}. \quad (3)$$

где x — глубина проникновения коррозии;

D — коэффициент диффузии;

erfc^{-1} — функция, обратная функции ошибки Гаусса;

C_{th} — пороговая концентрация хлоридов, при которой начинается разрушение защитной пленки металла и начинается коррозия;

C_0 — поверхностная концентрация хлоридов.

Введем дискретные коррозионные состояния. В таблице 1 представлены 6 стадий — от начального элемента до потери устойчивости, каждая из которых характеризуется потерей сечения элемента.

Таблица 1. Классификации стадий коррозии

Стадии коррозии	Состояние	Процент коррозии, %
стадия 1	Нет коррозии	0
стадия 2	Незначительная коррозия	0- 1
стадия 3	Умеренная коррозия	1- 3
стадия 4	Сильная коррозия	3- 8
стадия 5	Усиленная коррозия	8- 15
стадия 6	Потеря устойчивости	>15

Переход к вероятностной модели требует введения конечного числа состояний. Это не формальность, а следствие ключевого физического факта: опасность коррозии для сжатого стержня определяется не потерей массы, а нелинейным снижением его устойчивости.

3. Результаты исследования и их анализ

В нашем исследовании рассматриваются сжатые стержневые элементы ферменной конструкции коробчатого сечения 80х60х5мм и 50х5мм. Исходная площадь для прямоугольного замкнутого профиля с внешними размерами b (ширина) и h (высота), толщиной стенки s :

$$A_0 = 2s(b + h - 2s) \quad (4)$$

В свою очередь площадь поперечного сечения $A_{(t)}$ в момент времени t :

$$A_{(t)} = 2 \begin{cases} s(b + h - 2s) & (\text{коррозия не началась}) \\ s - r_{corr}(t - T_{corr})[b + h - 2(s - r_{corr}(t - T_{corr}))] & \end{cases} \quad (5)$$

где s — начальная толщина стенки,

r_{corr} — скорость коррозии,

T_{corr} — время начала коррозии,

b, h — геометрические размеры коробчатого профиля.

Для задач устойчивости определяющим является момент инерции $I_{x(t)}$ относительно оси возможного выпучивания. Для оси x :

$$I_{x(0)} = \frac{bh^3}{12} - \frac{(b - 2s)(h - 2s)^3}{12}. \quad (6)$$

После начала коррозии толщина стенки уменьшается:

$$s_{eff(t)} = s - r_{corr}(t - T_{corr}). \quad (7)$$

Внешние размеры b и h в данной модели считаем неизменными (коррозия идёт с внутренней и внешней сторон стенки).

$$I_{x(t)} = 2 \begin{cases} \frac{bh^3}{12} - \frac{(b - 2s)(h - 2s)^3}{12} & , \text{ при } t < T_{corr} \\ \frac{bh^3}{12} - \frac{(b - 2s_{eff(t)})(h - 2s_{eff(t)})^3}{12} & , \text{ при } t \geq T_{corr} \end{cases} \quad (8)$$

где $I_{(t)}$ — момент инерции поперечного сечения в момент времени t ,

b, h — геометрические размеры коробчатого профиля,

s — начальная толщина стенки,

$s_{eff(t)}$ — эффективная толщина стенки в момент времени t ,

r_{corr} — скорость коррозии,

T_{corr} — время начала коррозии.

Радиус инерции и расчетная гибкость задаются по СП 16.13330.2017 п.7.1.1 [24]:

$$i(t) = \sqrt{\frac{I_{(t)}}{A_{(t)}}}, \quad \lambda(t) = \frac{\mu L}{i(t)}, \quad (9)$$

где μ — коэффициент расчётной длины, L — геометрическая длина стержня.

Проверка устойчивости центрально-сжатого элемента выполняется по СП 16.13330.2017 [24]:

$$\frac{N}{\varphi A_n R_y \gamma_c} \leq 1, \quad N_{cr}(t) = \varphi(\lambda(t)) R_y A_{(t)} \quad (10)$$

где $\varphi = \varphi(\lambda, R_y)$ — коэффициент продольного изгиба, определяемый по таблицам 5 или 6 [24] в зависимости от гибкости λ ,

$A = A_{(t)}$ — расчётная площадь сечения.

Шесть состояний (S_1 – S_6) были выделены на основе анализа двух взаимосвязанных параметров:

- критерий геометрического повреждения, $\eta(A_{(t)})$ — относительная потеря площади сечения:

$$\eta(A_{(t)}) = [(A_{(0)} - A_{(t)})/A_{(0)}] \cdot 100\% ; \quad (11)$$

- критерий функциональной деградации, $\eta(N_{(t)})$ — относительное снижение критической нагрузки:

$$\eta(N_{(t)}) = [(N_{cr(0)} - N_{cr(t)})/N_{cr(0)}] \cdot 100\%, \quad (12)$$

где $N_{cr(0)}$ — начальная критическая нагрузка (для состояния S_1),

$N_{cr(t)}$ — текущая критическая нагрузка в момент t , рассчитываемая по (10). Это интегральный показатель, потому что он учитывает не просто потерю площади, но и влияние коррозии на жёсткость $I_{(t)}$ через рост гибкости $\lambda(t)$ и падение коэффициента φ .

В соответствии с данными работы [23], а также исходной постановкой задачи, строится не классическая матрица вероятностей переходных состояний за шаг, а нижнетреугольная матрица траекторий (накопленных вероятностей).

Элемент матрицы $p_{corr(i,j,t)}$ представляет собой вероятность того, что элемент, который в момент времени 0 был в состоянии 1, к моменту t находится в состоянии i , при условии, что он достиг состояния j в процессе деградации. Это отличается от классической Марковской модели $P(X_{(t)} = i | X_{(0)} = j)$. Нижнетреугольная структура матрицы объясняется невозможностью улучшения состояния (коррозия необратима) и последовательным характером повреждений.

Первый столбец матрицы показывает $p_{corr(i,1,t)}$ — вероятность того, что элемент, который в момент времени 0 был в состоянии 1, находится в состоянии i в момент времени t . Вероятность того, что система перемещается от коррозии i -ой стадии к коррозии j -ой стадии в течение периода времени T_k определяется как

$$p_{corr(i,j)} = \text{вероятность перейти из состояния } i \text{ в состояние } j. \quad (13)$$

Связанные с этим вероятности перехода от одной стадии коррозии к другой могут быть смоделированы. Важно отметить, что вероятность перехода от стадии 1 коррозии к любой другой стадии изменяется со временем, так как коррозионные стадии имеют различные вероятности начала. Время коррозии для $p_{corr(i,j)}(nT_k)$

$$T_{corr} = (n - 1)T_k. \quad (14)$$

Вероятности перехода от одной стадии коррозии к другой записываются в матричном виде:

$$P_{corr}(nT_k) = \begin{bmatrix} p_{corr(1,1)}(nT_k) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ p_{corr(1,2)}(nT_k) & p_{corr(2,2)} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ p_{corr(1,3)}(nT_k) & p_{corr(2,3)} & p_{corr(3,3)} & 0 & 0 & 0 \\ p_{corr(1,4)}(nT_k) & p_{corr(2,4)} & p_{corr(3,4)} & p_{corr(4,4)} & 0 & 0 \\ p_{corr(1,5)}(nT_k) & p_{corr(2,5)} & p_{corr(3,5)} & p_{corr(4,5)} & p_{corr(5,5)} & 0 \\ p_{corr(1,6)}(nT_k) & p_{corr(2,6)} & p_{corr(3,6)} & p_{corr(4,6)} & p_{corr(5,6)} & p_{corr(6,6)} \end{bmatrix} \quad (15)$$

Важным условием модели является полнота пространства событий:

$$\sum_{\forall \beta} p_{corr(\alpha,\beta)} = 1. \quad (16)$$

В определенный момент времени для конструктивной системы ферм с N стержневыми элементами существует $2N$ структурных состояний и 6 стадий коррозии. Следовательно,

имеется $6 \times 2N$ различных возможных состояний системы при учете воздействия коррозии. Новый вектор состояния системы определяется как

$$S_c(nT_k) = \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{bmatrix}, \quad (17)$$

где S_k , $k=1,2,\dots,6$, представляет вероятности определенного структурного состояния, связанного со стадией коррозии k .

$$S_k = \begin{bmatrix} P(\text{состояние}(1, k)) \\ P(\text{состояние}(2, k)) \\ P(\text{состояние}(3, k)) \\ P(\text{состояние}(4, k)) \\ \vdots \\ P(\text{состояние}(n, k)) \end{bmatrix} \quad (18)$$

Пусть P_{Sk} представляет матрицу перехода для системы на стадии коррозии k

$$P_{Sk} = \begin{bmatrix} p_{k1,1} & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{k1,N} & \cdots & p_{kN,N} \end{bmatrix} \quad (19)$$

где

$$P_{ki,j} = \begin{cases} p_{k(i,j)} & i \geq j \\ 0 & i < j \end{cases} \quad (20)$$

Тогда общая матрица должна иметь вид:

$$P_c(nT_k) = \begin{bmatrix} p_{c(1,1)}(nT_k) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ p_{c(1,2)}(nT_k) & p_{c(2,2)} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ p_{c(1,3)}(nT_k) & p_{c(2,3)} & p_{c(3,3)} & 0 & 0 & 0 \\ p_{c(1,4)}(nT_k) & p_{c(2,4)} & p_{c(3,4)} & p_{c(4,4)} & 0 & 0 \\ p_{c(1,5)}(nT_k) & p_{c(2,5)} & p_{c(3,5)} & p_{c(4,5)} & p_{c(5,5)} & 0 \\ p_{c(1,6)}(nT_k) & p_{c(2,6)} & p_{c(3,6)} & p_{c(4,6)} & p_{c(5,6)} & p_{c(6,6)} \end{bmatrix} \quad (21)$$

где

$$P_{ci,j} = p_{corr(i,j)} P_{si}. \quad (22)$$

Таким образом,

$$S_c(nT_k) = (\prod_{i=1}^n P_c(i T_k)) S_c(0). \quad (23)$$

Вероятность всей системы за определенный период времени T_k равна

$$P_{sys}(nT_k) = \sum_{\substack{i=\text{функциональное} \\ \text{состояние}}} S_c(nT_k) i, \quad (24)$$

где $S_c(nT_k) i$ - i -й элемент в $S_c(nT_k)$.

Для описания распределений вероятностей $p_{corr(1,1)} - p_{corr(1,6)}$ используется асимметричная Гауссова функция с обрезкой хвоста:

$$w(t) = \begin{cases} a \exp\left(-\frac{(t-b)^2}{2c^2}\right), & t < b, \\ a \exp\left(-\frac{(t-b)^2}{2d^2}\right), & t \geq b, \\ 0, & t > t_c, \end{cases} \quad (25)$$

где a, b, c, d — параметры формы, t_c — время обрезки, определяемое по экспериментальным данным как последнее t , для которого $w(t)$ остается выше малого порога (в реализации используется критерий $y > 0,001$). Для $p_{(1,1)}$ (вероятность остаться в состоянии 1) применяется последовательная зависимость с обрезкой:

$$w_{11}(t) = \begin{cases} 1, & t < t_1, \\ \frac{L}{1 + \exp[-k(x - x_0)]}, & t_1 < t \leq t_c, \\ 0, & t > t_c, \end{cases} \quad (26)$$

где L, k, x_0 — параметры, t_1 — момент начала убывания (в реализации $t_1=20$).

Параметры оцениваются нелинейным методом наименьших квадратов. Для повышения устойчивости подгонки используется многократный запуск с вариацией начального приближения; выбирается решение с максимальным R^2 , приоритетный порог в реализации — $R^2 \geq 0.99$, данный коэффициент вычисляется по классической формуле

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_n (y_n - \widehat{y}_n)^2}{\sum_n (y_n - \overline{y_n})^2}. \quad (27)$$

Полная матрица $P(t)$ строится на временной сетке и дополняется недостающими переходами из состояний $S_2 \dots S_5$. В реализованной схеме соседние переходы $2 \rightarrow 3, 3 \rightarrow 4, 4 \rightarrow 5, 5 \rightarrow 6$ аппроксимируются той же формой (25), при этом начальные приближения параметров задаются масштабированием параметров эталона p_{12} (время и амплитуда), а «дальние» переходы $i \rightarrow j$ при $j > i + 1$ формируются преобразованием базовой соседней кривой $i \rightarrow i + 1$ с растяжением по времени и уменьшением амплитуды:

$$w_{i,j}(t) = \beta_\Delta w_{i,j+1}\left(\frac{t - \delta_\Delta}{\alpha_\Delta}\right), \quad \Delta = j - i \quad (28)$$

где в расчетной реализации $\delta_\Delta = 0$, а коэффициенты $\alpha_\Delta, \beta_\Delta$ заданы таблично по Δ (для $\Delta = 1 \dots 5$). Вводится ненулевая вероятность «остаться» в состоянии в виде экспоненциального спада $w_{i,i}(t) = \exp(-\lambda_i t)$ при $\lambda_i = 0,01(i + 1)$. Далее для каждого t_k выполняется нормировка по допустимым исходам, и переходные вероятности получаются как

$$P_{i,j}(t_k) = \frac{w_{i,j}(t_k)}{\sum_{m=i}^6 w_{i,m}(t_k)}, \quad \Delta = j \geq i. \quad (29)$$

Для каждой реализации генерируется траектория Xk до состояния S_6 ; время отказа τ определяется как первый момент достижения состояния 6. Функция надежности оценивается эмпирически:

$$R(t_k) = P\{\tau > t_k\} \approx \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N 1\{\tau_n > t_k\}, \quad F(t_k) = 1 - R(t_k), \quad (30)$$

где N — число реализаций. Дополнительно рассчитываются времена первого достижения состояний (first-passage time) и показатель накопления повреждений в виде математического ожидания номера состояния

$$E[X(t_k)] = \sum_{j=1}^6 j \hat{P}_j(t_k), \quad (31)$$

где $\hat{P}_j(t_k)$ — эмпирическая доля реализаций в состоянии j на момент t_k .

Нами разработаны программы, реализованные на языке Python с использованием библиотек numpy, pandas, scipy, scikit-learn, matplotlib. Эти программы позволяют формировать графики $F(t)$, $R(t)$, $E[X(t)]$, дают возможность интерактивного просмотра $P(t)$, строить ядро и матрицу переходов, по выборке времен отказов системы τ_{sys} строить кривую $R_{sys}(t)$ по формуле (30), собирать статистику времен переходов между состояниями, сохранять итоговый отчет. Заметим, что параметры моделирования (горизонт по времени, число реализаций Монте-Карло) задаются в коде программ и могут быть изменены для проверки сходимости статистических оценок.

На рисунке 1 представлено описание «ядра» вероятностной модели коррозии. Так как достоверно известны только данные по вероятностям переходов из 1 состояния в другие, то они и служат основой метода. Аппроксимация функций происходила с высокой степенью корреляции с исходными экспериментальными данными при $R^2 > 0,98$.

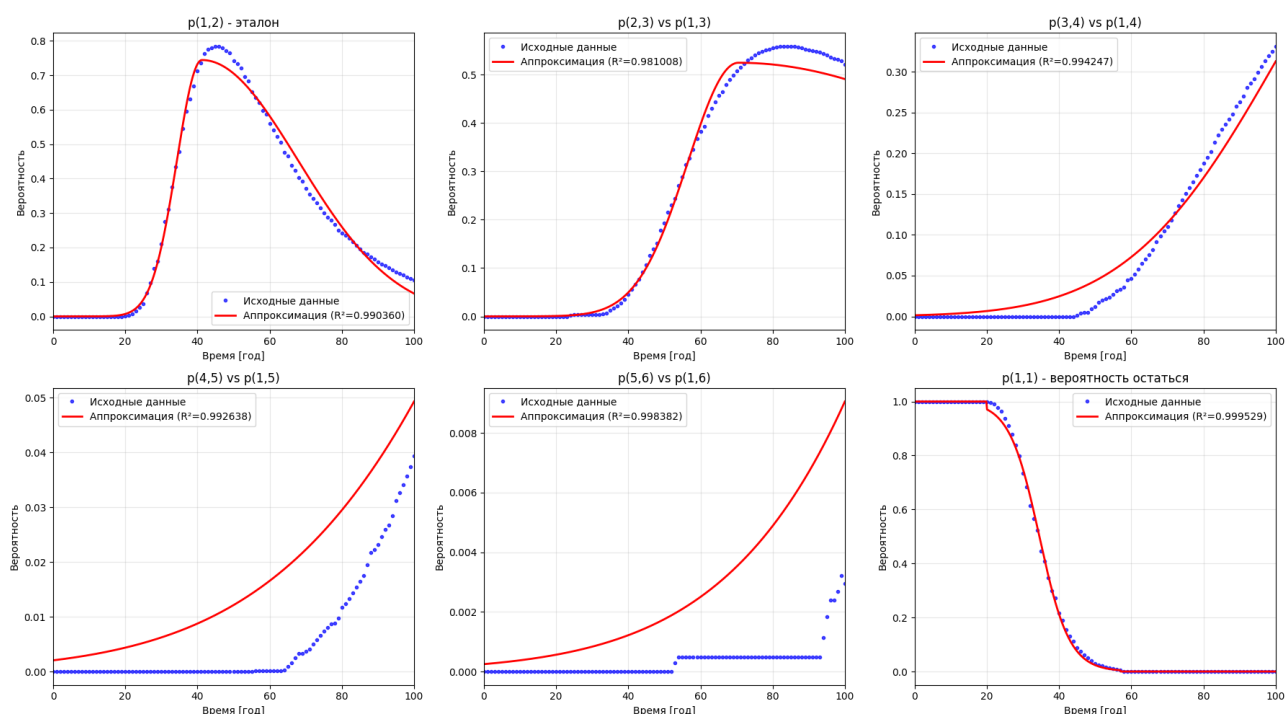


Рисунок 1 – Вывод «ядра» модели $p_{corr(1,j)}$ из $p_{corr(1,2)}$ с помощью математических преобразований, реализованное на языке Python, при $R^2 > 0,98$

На рисунке 2 представлены характерные временные срезы вероятностной матрицы переходов на 0, 25, 50, 75 годах. Так как данная матрица функциональная, она представляет вероятности переходов из соответствующего состояния в следующие с привязкой к конкретному моменту времени.

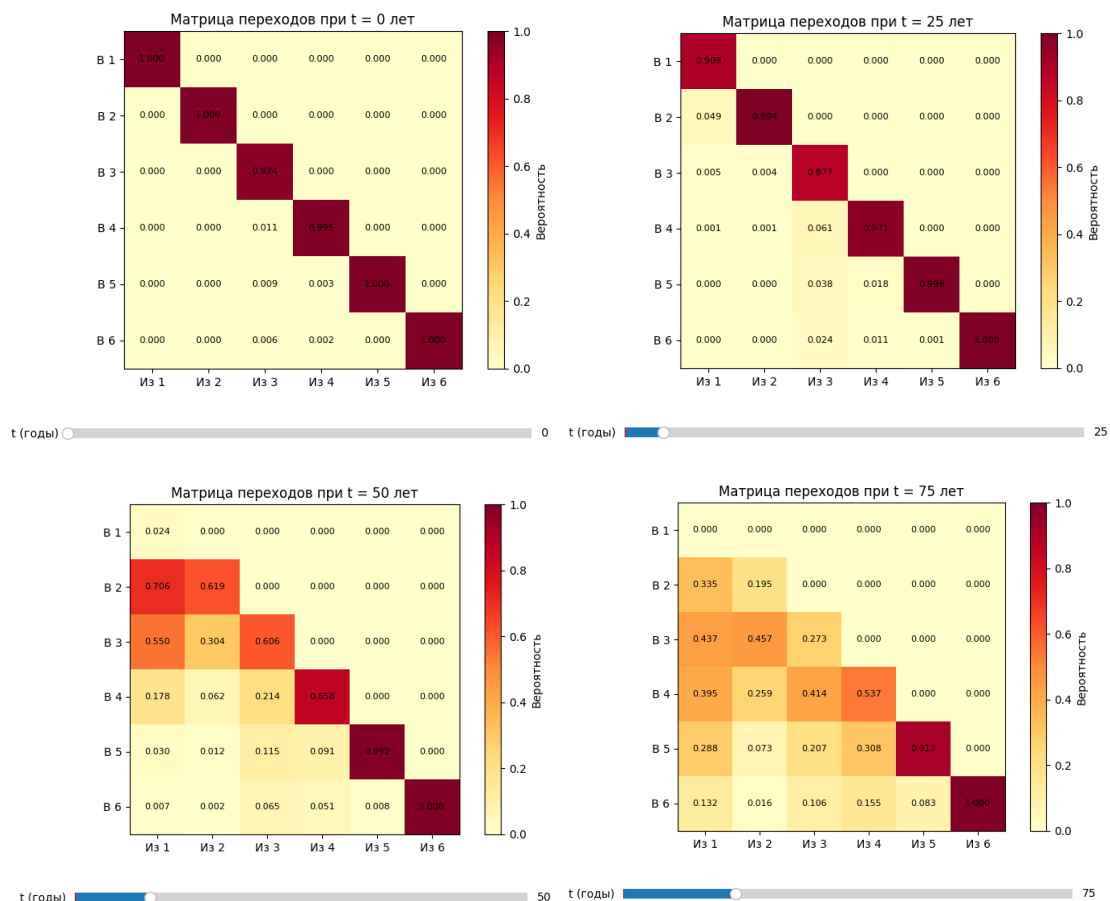


Рисунок 2 – Типовые срезы времени функциональной матрицы переходных вероятностей

На рисунке 3 представлена реализация модели накопления повреждений, реализованная для одного стержневого элемента из стали СТЗПС при интенсивной агрессивности среды. Данные получены с помощью метода Монте-Карло при 50 000 симуляций.

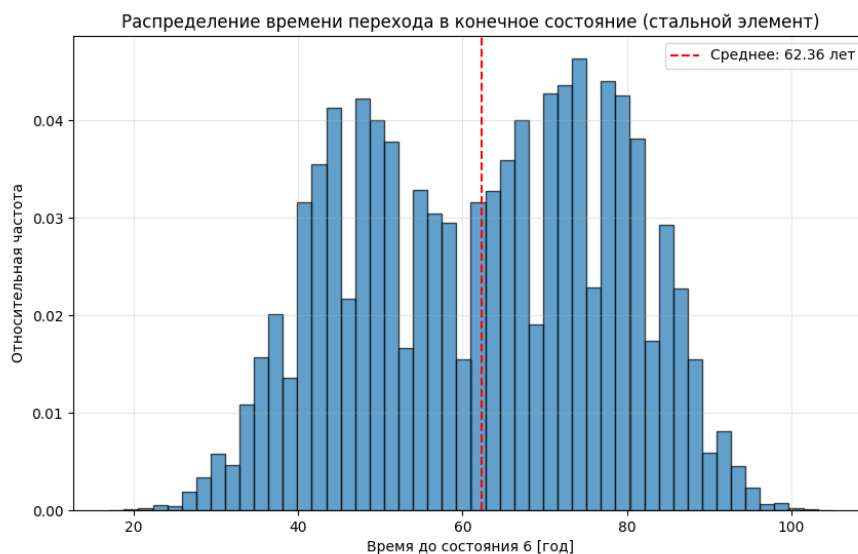


Рисунок 3 – Распределение времени отказа стального стержня с применением вероятностной модели накопления повреждений

На рисунках 4 и 5 представлены графики функции распределения времени отказа $F(t)$ и надежности $R(t)$ для единичного стального элемента, полученные с помощью метода Монте-Карло при 50 000 симуляций.

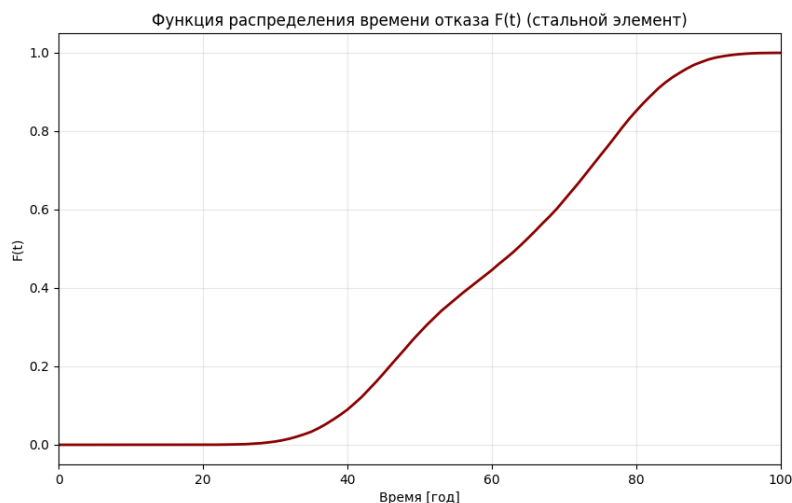


Рисунок 4 – График функции распределения времени отказа $F(t)$ для стального элемента

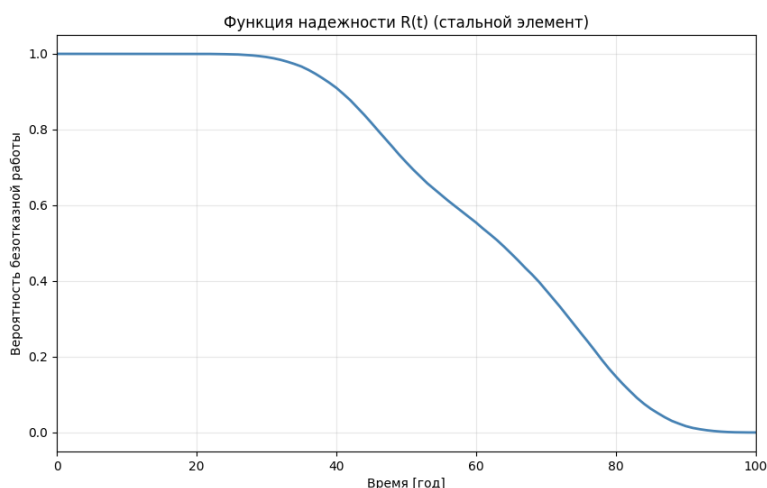


Рисунок 5 – График функции надежности $R(t)$ для стального элемента

Далее рассмотрена металлическая ферма, которая состоит из 18 элементов с разделением на критические и некритические группы. Для каждого элемента моделируется независимая деградация по одной и той же матрице $P(t)$, а отказ системы фиксируется по логическим условиям предельного состояния: отказ любой стойки или любого элемента верхнего пояса, либо отказ двух и более элементов нижнего пояса (связи рассматриваются как некритические).

На рисунке 6 представлена реализация модели надежности для 18-элементной ферменной конструкции с учетом разделения элементов по ответственности и накоплением дефектов в системе при агрессивном воздействии внешней среды.

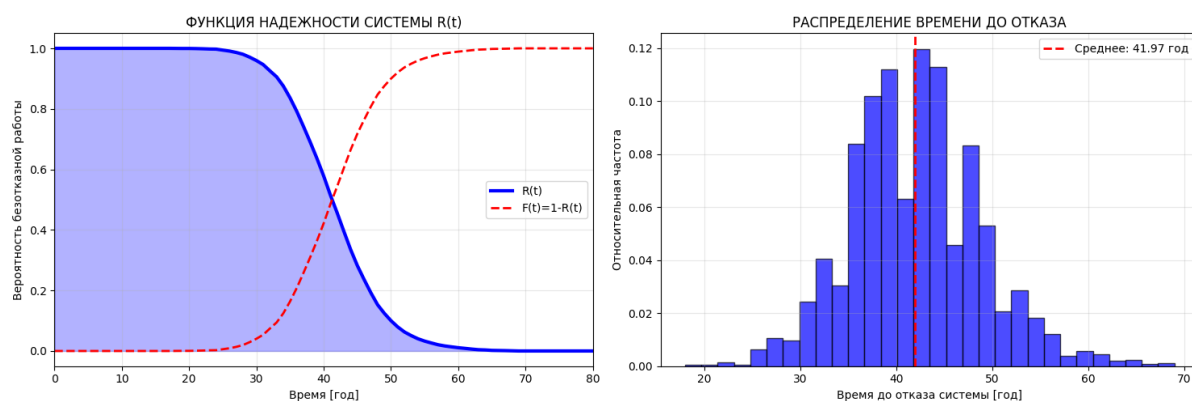


Рисунок 6 – График функции надежности и распределение времени до отказа для 18-элементной ферменной конструкции

4. Заключение

1. Сформирована и вычислительно реализована вероятностная методика оценки надежности ферменных конструкций при коррозионном износе, основанная на марковском описании деградации как последовательности необратимых переходов между шестью дискретными коррозионными состояниями $S_1 - S_6$.

2. Показано, что «ядро» вероятностной модели, заданное экспериментально наблюдаемыми зависимостями $P_{(1,j,t)}$, может быть восстановлено и аппроксимировано параметрическими функциями с высокой согласованностью с исходными данными; в расчетной реализации качество идентификации обеспечивается на уровне $R^2 > 0,98$, что позволяет использовать полученные зависимости как основу для построения полной матрицы переходов во времени.

3. Построена функциональная матрица вероятностей переходных состояний $P_{corr}(t)$, включающая недостающие переходы и обеспечивающая полноту пространства событий (нормировку по исходному состоянию). Тем самым получено согласованное вероятностное описание «накопления повреждений» на всей шкале состояний и для всех временных срезов, применимое как к отдельному стержню, так и к системе в целом.

4. На основе калиброванной матрицы $P_{corr}(t)$ методом Монте-Карло получены количественные оценки ресурса одиночного стального элемента ферменной конструкции при заданной интенсивности коррозионного воздействия. При 50 000 реализациях состояние S_6 достигалось во всех траекториях (доля достижений 1.000), среднее время до отказа составило 62,54 года, медиана — 64 года, стандартное отклонение — 16 лет, коэффициент вариации $CV = 0,2558$. Характерные времена первого достижения промежуточных состояний составили: $S_2 - 28,88$ года; $S_3 - 38,46$ года; $S_4 - 41,08$ года; $S_5 - 45,64$ года.

5. Показано, что переход от оценки элемента к оценке системы в целом принципиально меняет временной профиль надежности за счет структурной значимости стержневых элементов ферменной конструкции и заданных условий отказа. Для 18-элементной фермы (7 критических и 11 некритических элементов) при 50 000 реализациях получены: среднее время отказа 41,88 года, медиана 42 года, стандартное отклонение 6,84 года, $CV = 0,1633$. По принятому критерию отказа надежность системы на горизонте 100 лет стремится к нулю ($R_{sys}(100) = 0$), что подтверждает чувствительность ферменной системы к отказам критических элементов при интенсивном коррозионном воздействии.

6. Полученные результаты подтверждают практическую применимость предложенной схемы «эксперимент → идентификация ядра → построение $P_{corr}(t)$ → метод Монте-Карло

для элемента и системы»: методика обеспечивает расчет функций надежности $R(t)$, $F(t)$, характерных времен деградации по стадиям и статистик разброса, что может быть использовано для инженерной диагностики, обоснования сроков обследований и выбора ремонтных воздействий с учетом различной ответственности элементов фермы.

5.Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания в сфере научной деятельности Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект по теме «Оценка технического состояния зданий на основе параметров живучести и риска», номер темы FSWG 2024-0003 (госзадание НИУ МГСУ).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kayser J.R., Nowak A.S. Reliability of corroded steel girder bridges // *Structural Safety*. 1989. Vol. 6. No. 1. P. 53–63. DOI: 10.1016/0167-4730(89)90007-6.
2. Czarnecki A.A., Nowak A.S. Time-variant reliability profiles for steel girder bridges // *Structural Safety*. 2008. Vol. 30. No. 1. P. 49–64. DOI: 10.1016/j.strusafe.2006.05.002.
3. Gong C., Frangopol D.M. Reliability of steel girder bridges with dependent corrosion growth // *Engineering Structures*. 2020. Vol. 224. Art. 111125. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.111125.
4. Тамразян А.Г., Мацевич Т.А., Савин С.Ю. Оценка технического состояния несущих конструкций зданий на основе прогнозировании риска аварии / *Строительство и реконструкция*. 2024. № 6 (116). С. 82-91. DOI: 10.33979/2073-2024-116-6-82-91.
5. Соловьев С.А., Соловьева А.А. Методы вероятностного проектирования элементов строительных конструкций на новый уровень надежности. Вологда: Вологодский государственный университет, 2022. 99 с.
6. Melchers R.E. Probabilistic Model for Marine Corrosion of Steel for Structural Reliability Assessment // *Journal of Structural Engineering*. 2003. Vol. 129. No. 11. P. 1484–1493. DOI: 10.1061/(asce)0733-9445(2003)129:11(1484).
7. Melchers R.E. New insights from probabilistic modelling of corrosion in structural reliability analysis // *Structural Safety*. 2021. Vol. 88. Art. 102034. DOI: 10.1016/j.strusafe.2020.102034.
8. Qin S., Cui W. Effect of corrosion models on the time-dependent reliability of steel plated elements // *Marine Structures*. 2003. Vol. 16. No. 1. P. 15–34. DOI: 10.1016/S0951-8339(02)00028-X.
9. Шереметьева Е.С. Вероятностные модели коррозионного износа строительных сталей // *Вестник МГСУ*. 2019.
10. de la Fuente D., Díaz I., Simancas J., Chico B., Morcillo M. Long-term atmospheric corrosion of mild steel // *Corrosion Science*. 2011. Vol. 53. No. 2. P. 604–617. DOI: 10.1016/j.corsci.2010.10.007.
11. Chico B., De la Fuente D., Díaz I., Simancas J., Morcillo M. Annual Atmospheric Corrosion of Carbon Steel Worldwide. An Integration of ISOCORRAG, ICP/UNECE and MICAT Databases // *Materials*. 2017. Vol. 10. No. 6. Art. 601. DOI: 10.3390/ma10060601.
12. Landolfo R., Cascini L., Portoli F. Modeling of Metal Structure Corrosion Damage: A State of the Art Report // *Sustainability*. 2010. Vol. 2. No. 7. P. 2163–2175. DOI: 10.3390/su2072163.
13. Guo S., Si R., Dai Q., You Z., Ma Y., Wang J. A critical review of corrosion development and rust removal techniques on the structural/environmental performance of corroded steel bridges // *Journal of Cleaner Production*. 2019. Vol. 233. P. 126–146. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.06.023.
14. Колчунов В.И. Развитие методов анализа надежности усиливаемых конструкций при техногенных воздействиях. – М.: ПААСН, 2004. – 210 с.
15. van Noortwijk J.M. A survey of the application of gamma processes in maintenance // *Reliability Engineering & System Safety*. 2009. Vol. 94. No. 1. P. 2–21. DOI: 10.1016/j.ress.2007.03.019.
16. Frangopol D.M., Kallen M.-J., van Noortwijk J.M. Probabilistic models for life-cycle performance of deteriorating structures: review and future directions // *Progress in Structural Engineering and Materials*. 2004. Vol. 6. No. 4. P. 197–212. DOI: 10.1002/pse.180.
17. Biondini F., Frangopol D.M. Life-Cycle Performance of Deteriorating Structural Systems under Uncertainty: Review // *Journal of Structural Engineering*. 2016. Vol. 142. No. 9. Art. F4016001. DOI: 10.1061/(asce)st.1943-541x.0001544.
18. Seçer M., Saylan A.A. Time-dependent advanced analysis method for steel truss bridges under atmospheric corrosion // *Advances in Bridge Engineering*. 2025. Vol. 6. No. 1. Art. 34. DOI: 10.1186/s43251-025-00181-5.
19. Matseevich T.A., Dankov S.A. Probabilistic approach of state transition elements of truss structures at corrosion // *E3S Web of Conferences*. 2024. Vol. 535. Art. 01003. DOI: 10.1051/e3sconf/202453501003.

20. Пшеничкина В.А., Рекунов С.С., Иванов С.Ю. Вероятностный анализ динамических характеристик системы «сооружение – слоистое основание» // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2024. № 8 (788). С. 32–43. DOI: 10.32683/0536-1052-2024-788-8-32-43.
21. Albrecht P., Naeemi A.H. Performance of Weathering Steel in Bridges. NCHRP Report 272. Washington, DC: Transportation Research Board, National Research Council; 1984. Available at: http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/nchrp/nchrp_rpt_272.pdf.
22. McCuen R.H., Albrecht P. Reanalysis of thickness loss data for weathering steel. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2004;16(3):237–246. DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2004)16:3(237).
23. Kim S., Frangopol D.M. Inspection and monitoring planning for RC structures based on minimization of expected damage detection delay. *Probabilistic Engineering Mechanics*. 2011;26(2):308–320. DOI: 10.1016/j.proengmech.2010.08.009.
24. СП 16.13330.2017. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81.

REFERENCES

1. Kayser J.R., Nowak A.S. Reliability of corroded steel girder bridges. *Structural Safety*. 1989. Vol. 6. No. 1. Pp. 53-63. DOI: 10.1016/0167-4730(89)90007-6.
2. Czarnecki A.A., Nowak A.S. Time-variant reliability profiles for steel girder bridges. *Structural Safety*. 2008. Vol. 30. No. 1. Pp. 49-64. DOI: 10.1016/j.strusafe.2006.05.002.
3. Gong C., Frangopol D.M. Reliability of steel girder bridges with dependent corrosion growth. *Engineering Structures*. 2020. Vol. 224. Art. 111125. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.111125.
4. Tamrazyan A.G., Matseevich T.A., Savin S.Yu. Otsenka tekhnicheskogo sostoyaniya nesushchikh konstruktsiy zdaniy na osnove prognozirovaniya riska avarii [Assessment of the technical condition of load-bearing structures of buildings based on accident risk forecasting]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2024. No. 6 (116). Pp. 82-91. DOI: 10.33979/2073-2024-116-6-82-91. (rus)
5. Solovyev S.A., Solovyeva A.A. *Metody veroyatnostnogo proektirovaniya elementov stroitel'nykh konstruktsiy na novyy uroven' nadezhnosti* [Methods of probabilistic design of structural elements for a new reliability level]. Vologda: Vologda State University, 2022. 99 p. (rus)
6. Melchers R.E. Probabilistic model for marine corrosion of steel for structural reliability assessment. *Journal of Structural Engineering*. 2003. Vol. 129. No. 11. Pp. 1484-1493. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2003)129:11(1484).
7. Melchers R.E. New insights from probabilistic modelling of corrosion in structural reliability analysis. *Structural Safety*. 2021. Vol. 88. Art. 102034. DOI: 10.1016/j.strusafe.2020.102034.
8. Qin S., Cui W. Effect of corrosion models on the time-dependent reliability of steel plated elements. *Marine Structures*. 2003. Vol. 16. No. 1. Pp. 15-34. DOI: 10.1016/S0951-8339(02)00028-X.
9. Sheremetyeva E.S. Veroyatnostnye modeli korrozionnogo iznosa stroitel'nykh staley [Probabilistic models of corrosion wear of structural steels]. *Vestnik MGSU*. 2019. (rus)
10. de la Fuente D., Díaz I., Simancas J., Chico B., Morcillo M. Long-term atmospheric corrosion of mild steel. *Corrosion Science*. 2011. Vol. 53. No. 2. Pp. 604-617. DOI: 10.1016/j.corsci.2010.10.007.
11. Chico B., De la Fuente D., Díaz I., Simancas J., Morcillo M. Annual atmospheric corrosion of carbon steel worldwide. An integration of ISOCORRAG, ICP/UNECE and MICAT databases. *Materials*. 2017. Vol. 10. No. 6. Art. 601. DOI: 10.3390/ma10060601.
12. Landolfo R., Cascini L., Portioli F. Modeling of metal structure corrosion damage: A state of the art report. *Sustainability*. 2010. Vol. 2. No. 7. Pp. 2163-2175. DOI: 10.3390/su2072163.
13. Guo S., Si R., Dai Q., You Z., Ma Y., Wang J. A critical review of corrosion development and rust removal techniques on the structural/environmental performance of corroded steel bridges. *Journal of Cleaner Production*. 2019. Vol. 233. Pp. 126-146. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.06.023.
14. Kolchunov V.I. *Razvitie metodov analiza nadezhnosti usilivaemykh konstruktsiy pri tekhnogennykh vozdeystviyakh* [Development of methods for reliability analysis of strengthened structures under technogenic impacts]. Moscow: RAASN, 2004. 210 p. (rus)
15. van Noortwijk J.M. A survey of the application of gamma processes in maintenance. *Reliability Engineering & System Safety*. 2009. Vol. 94. No. 1. Pp. 2-21. DOI: 10.1016/j.res.2007.03.019.
16. Frangopol D.M., Kallen M.-J., van Noortwijk J.M. Probabilistic models for life-cycle performance of deteriorating structures: Review and future directions. *Progress in Structural Engineering and Materials*. 2004. Vol. 6. No. 4. Pp. 197-212. DOI: 10.1002/pse.180.
17. Biondini F., Frangopol D.M. Life-cycle performance of deteriorating structural systems under uncertainty: Review. *Journal of Structural Engineering*. 2016. Vol. 142. No. 9. Art. F4016001. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001544.

18. Seçer M., Saylan A.A. Time-dependent advanced analysis method for steel truss bridges under atmospheric corrosion. *Advances in Bridge Engineering*. 2025. Vol. 6. No. 1. Art. 34. DOI: 10.1186/s43251-025-00181-5.
19. Matseevich T.A., Dankov S.A. Probabilistic approach of state transition elements of truss structures at corrosion. *E3S Web of Conferences*. 2024. Vol. 535. Art. 01003. DOI: 10.1051/e3sconf/202453501003.
20. Pshenichkina V.A., Rekunov S.S., Ivanov S.Yu. Veroyatnostnyy analiz dinamicheskikh kharakteristik sistemy "sooruzhenie - sloistoe osnovanie" [Probabilistic analysis of dynamic characteristics of the "structure-layered foundation" system]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitel'stvo*. 2024. No. 8 (788). Pp. 32-43. DOI: 10.32683/0536-1052-2024-788-8-32-43. (rus)
21. Albrecht P., Naeemi A.H. *Performance of Weathering Steel in Bridges*. NCHRP Report 272. Washington, DC: Transportation Research Board, National Research Council, 1984. Available at: http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/nchrp/nchrp_rpt_272.pdf.
22. McCuen R.H., Albrecht P. Reanalysis of thickness loss data for weathering steel. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2004. Vol. 16. No. 3. Pp. 237-246. DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2004)16:3(237).
23. Kim S., Frangopol D.M. Inspection and monitoring planning for RC structures based on minimization of expected damage detection delay. *Probabilistic Engineering Mechanics*. 2011. Vol. 26. No. 2. Pp. 308-320. DOI: 10.1016/j.proengmech.2010.08.009.
24. SP 16.13330.2017. *Steel Structures. Updated Edition of SNiP II-23-81*. Moscow: Ministry of Construction of Russia, 2017. (rus)

Информация об авторах:

Мацеевич Татьяна Анатольевна

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия,
д.ф.-м. н, профессор, E-mail: matseevichta@mgsu.ru

Данков Савелий Андреевич

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия,
аспирант, E-mail: olimp.botek@mail.ru

Information about authors:

Matseevich Tatiana A.

Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,
Doctor Of Physical And Mathematical Sciences, Professor,
E-mail: matseevichta@mgsu.ru

Dankov Saveliy A.

Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,
Postgraduate student, E-mail: olimp.botek@mail.ru

Статья поступила в редакцию 18.02.2026
Одобрена после рецензирования 09.03.2026
Принята к публикации 01.04.2026

The article was submitted 18.02.2026
Approved after reviewing 09.03.2026
Accepted for publication 01.04.2026