

## Вероятностное моделирование стальной ферменной конструкции с учетом коррозионной деградации стержневых элементов

Татьяна Анатольевна Мацевич, Савелий Андреевич Данков

Национальный исследовательский Московский государственный  
строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Длительная эксплуатация стальных ферм в агрессивных средах сопровождается коррозионной деградацией стержневых элементов, что приводит к снижению несущей способности и росту вероятности отказа. Детерминированные подходы к оценке ресурса часто дают избыточно консервативные прогнозы и не учитывают случайный характер развития повреждений. Цель исследования — разработка и верификация вероятностной методики оценки состояния и остаточного ресурса стальной ферменной конструкции с учетом пространственно-неоднородной коррозии.

**Материалы и методы.** Использована конечно-элементная модель типовой фермы в ANSYS Mechanical (элементы SHELL181) с сегментацией стенок профилей для имитации локальной деградации. Коррозионный процесс описан дискретными состояниями поврежденности в рамках марковской модели; переходы между состояниями моделировались по вероятностным законам с применением метода Монте-Карло. Алгоритм реализован специализированным Python-скриптом, интегрированным в расчетный контур ANSYS, с поэтапным обновлением геометрии, регенерацией сетки и пересчетом НДС.

**Результаты.** Для временного горизонта 70 лет получены: коэффициент запаса прочности 2,8, вероятность отказа менее  $10^{-4}$  и остаточный ресурс более 25 лет. Показано, что учет вероятностной природы переходов и пространственной вариативности коррозии существенно влияет на распределение напряжений и оценки надежности по сравнению с упрощенными детерминированными схемами.

**Выводы.** Предложенная методика обеспечивает количественно обоснованный прогноз деградации и может применяться для планирования мониторинга, сроков ремонта и мероприятий по обеспечению безопасности стальных ферменных систем.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** стальная ферменная конструкция, коррозионная деградация, вероятностное моделирование, цепи Маркова, метод Монте-Карло, остаточный ресурс

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Мацевич Т.А., Данков С.А. Вероятностное моделирование стальной ферменной конструкции с учетом коррозионной деградации стержневых элементов // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 4. С. 528–540. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.4.528-540

Автор, ответственный за переписку: Савелий Андреевич Данков, [olimp.botek@mail.ru](mailto:olimp.botek@mail.ru).

## Probabilistic modelling of a steel truss structure taking into account the corrosion degradation of the rod elements

Tatyana A. Matseevich, Saveliy A. Dankov

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);  
Moscow, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** Long-term operation of steel trusses in aggressive environments is accompanied by corrosion-induced degradation of the rod elements, which leads to reduced load-bearing capacity and an increased probability of failure. Deterministic approaches to service-life assessment often produce overly conservative predictions and do not account for the stochastic nature of damage evolution. The aim of this study is to develop and verify a probabilistic methodology for assessing the condition and residual service life of a steel truss structure while accounting for spatially heterogeneous corrosion.

**Materials and methods.** A finite element model of a typical truss was implemented in ANSYS Mechanical (SHELL181 elements), with segmentation of profile walls to simulate local degradation. The corrosion process was represented by discrete damage states within a Markov framework; transitions between states were modeled using probabilistic laws and the Monte Carlo method. The algorithm was implemented as a specialized Python script integrated into the ANSYS computational workflow, with stepwise geometry updates, mesh regeneration, and recalculation of the stress-strain state.

**Results.** For a 70-year time horizon, the following values were obtained: a safety factor of 2.8, a failure probability below  $10^{-4}$ , and a residual service life exceeding 25 years. It is shown that accounting for the probabilistic nature of state transi-

tions and the spatial variability of corrosion significantly affects stress distribution and reliability estimates compared with simplified deterministic schemes.

**Conclusions.** The proposed methodology provides a quantitatively substantiated forecast of degradation and can be applied to planning monitoring programs, repair scheduling, and safety assurance measures for steel truss systems.

**KEYWORDS:** steel truss structure, corrosion deterioration, probabilistic modelling, Markov chains, Monte Carlo method, residual service life

**FOR CITATION:** Matseevich T.A., Dankov S.A. Probabilistic modelling of a steel truss structure taking into account the corrosion degradation of the rod elements. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(4): 528-540. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.4.528-540 (rus.).

*Corresponding author:* Savelyi A. Dankov, olimp.botek@mail.ru.

## ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение безопасной эксплуатации строительных конструкций, значительная часть которых превысила нормативные сроки службы, представляет собой значимую проблему в области безопасности зданий и сооружений [1, 2]. Существующие детерминированные подходы к оценке остаточного ресурса зачастую демонстрируют избыточную консервативность, что приводит к экономически неоптимальным решениям [3].

Актуальность вопроса потери несущей способности элементов зданий и сооружений вследствие коррозии продолжает возрастать особенно для конструкций, эксплуатирующихся в агрессивных средах [4–6]. Научные исследования показывают, что важнейшими аспектами обеспечения безопасности строительных объектов являются комплексный мониторинг состояния конструкций и анализ вероятностей отказов [7–9]. Оценка надежности металлических сооружений, работающих в условиях длительной атмосферной коррозии, остается одной из ключевых задач современной строительной механики [10, 11]. В реальных условиях эксплуатации стальные фермы, балки и другие стержневые элементы подвергаются воздействию коррозионных процессов, приводящих к постепенному уменьшению стенок профиля и изменению напряженно-деформированного состояния [12, 13]. Изменение геометрии профиля ведет к снижению несущей способности, увеличению вероятности локального или глобального разрушения и, в конечном итоге, уменьшению срока службы сооружения [14].

В отечественной и зарубежной литературе представлены различные подходы к оценке надежности конструкций в условиях неопределенности [15–17]. Среди них выделяются детерминированные модели, основанные на теории прочности и деформаций, а также вероятностные методы [18]. Последние позволяют учитывать изменчивость эксплуатационных факторов и случайную природу процессов деградации [19]. Особенно важно корректное описание переходных процессов в снижении толщины стенок профиля [20]. Развитие вероятностных методов тесно связано с введением концепции марковских процессов для описания изменения состояния сооружения в течение жизненного цикла (ЖЦ) [21–23]. Марков-

ские цепи с непрерывным временем дают возможность моделировать поэтапный характер деградации, где каждое состояние соответствует определенному уровню повреждения [24]. Такое представление было подробно исследовано в рамках теории надежности [25]. Для моделирования коррозии требуется установить плотности вероятности переходов — функции времени, описывающие интенсивность перехода из состояния  $i$  в состояние  $j$  [26]. Именно эти функции определяют динамику деградации конструкции и позволяют переходить от качественного описания процесса к количественному прогнозированию остаточного ресурса [27].

В работе [28] изучались переходы между состояниями элементов ферм на основе данных экспериментов коррозионного старения. Было показано, что реальные плотности вероятности переходов можно аппроксимировать распределениями Гумбеля и асимметричными гауссовыми функциями. Однако переходы между состояниями рассматривались как независимые функции.

Цель исследования состоит в апробации методики моделирования коррозионного износа стальных ферменных систем и верификации с ее реализацией в программном комплексе (ПК) ANSYS Mechanical.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для верификации разработанной методологии выбрана типовая стержневая система, применяемая в строительных конструкциях. Универсальный характер выбранной геометрической схемы подтверждается ее адаптивностью к различным конструктивным решениям и способностью функционировать в условиях разнородных напряженных состояний. Это свойство позволяет рассматривать предложенную схему как репрезентативную модель для анализа работы стальных ферменных конструкций общего назначения.

### Геометрическое моделирование в среде ANSYS Workbench

Для численной реализации расчетной схемы в ПК ANSYS Mechanical была создана конечно-элементная модель в модуле ANSYS Workbench, предназначенная для квазистатического анализа<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> В работе использовался ANSYS Mechanical APDL Theory Reference. ANSYS, Inc., 2021 R2.

Геометрическое построение выполнено в среде SpaceClaim с учетом следующих параметров: конструкция фермы габаритными размерами  $4000 \times 1160$  мм включает два типа стержневых элементов (рис. 1). Верхний и нижний пояса изготовлены из коробчатого стального профиля  $80 \times 60 \times 5$  мм. Элементы решетки (стойки и раскосы) представлены профилем сечением  $50 \times 5$  мм.

Ключевой особенностью методики является дискретизация каждого профиля на составные элементы. Для моделирования коррозионного повреждения каждая стенка профиля представлена отдельно конечными элементами типа SHELL181 с дополнительным разделением на сегменты длиной 200 мм. Соединение сегментов выполнено с применением технологии Shared Topology, обеспечивающей совместную работу сетки и корректный перенос уси-

лий между элементами (рис. 2). Данный подход позволяет:

- реализовать стохастическое распределение коррозионных повреждений по длине элементов и между отдельными стенками профилей;
- учитывать пространственную неоднородность деградации материала;
- повысить точность определения локальных концентраторов напряжений.

В библиотеке материалов модели задана сталь марки Ст3пс с характеристиками, соответствующими действующим нормативным документам.

### Задание граничных условий и нагрузок в ANSYS Workbench

В модуле Model заданы граничные условия и нагрузки. К верхнему поясу фермы приложена распределенная нагрузка  $q = 5$  кН/м (рис. 3, а), со-

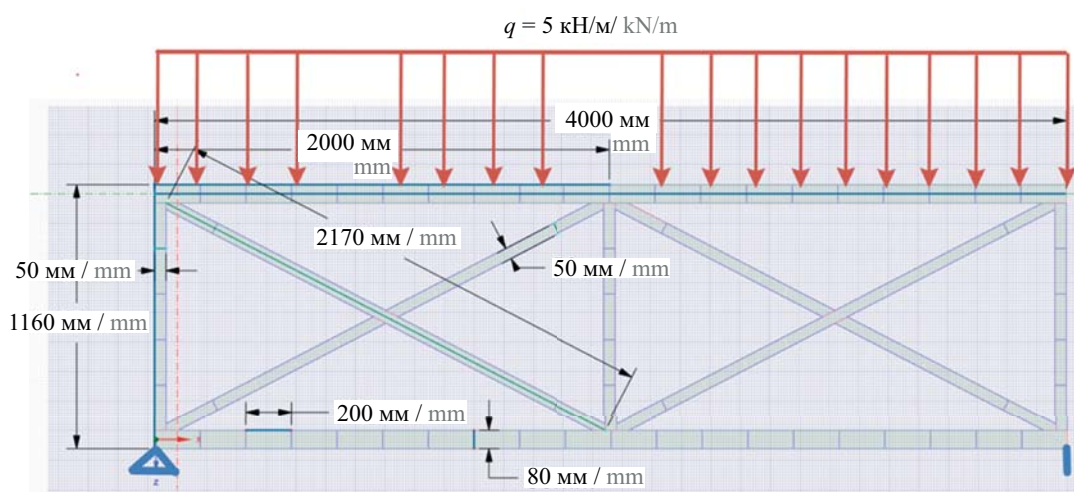


Рис. 1. Схема ферменной конструкции, устройства опирания, приложения нагрузки и геометрических характеристик

Fig. 1. Truss structure layout, support conditions, load application, and geometric parameters

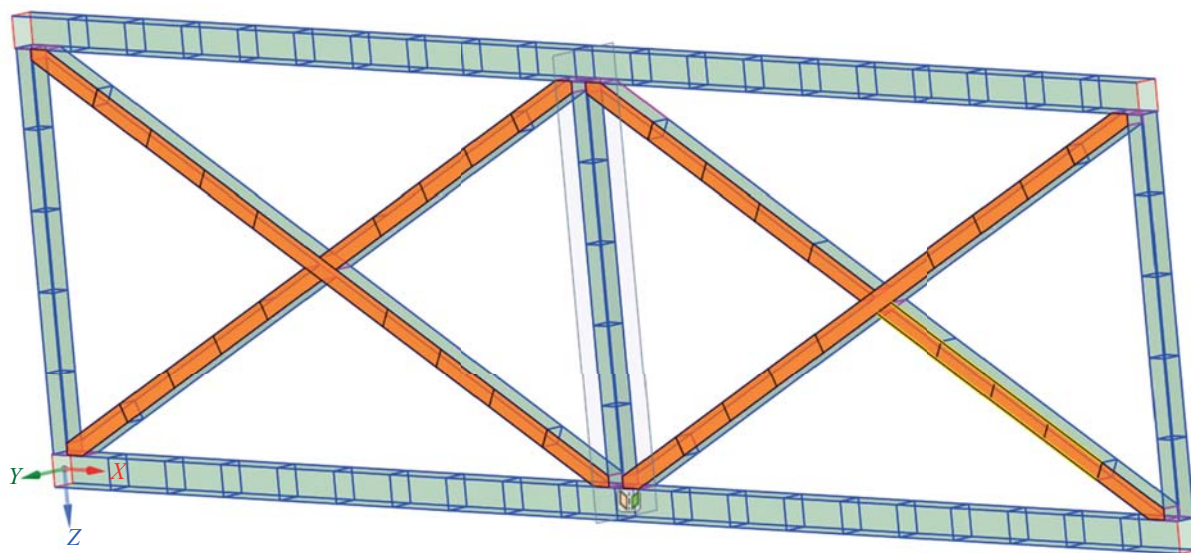
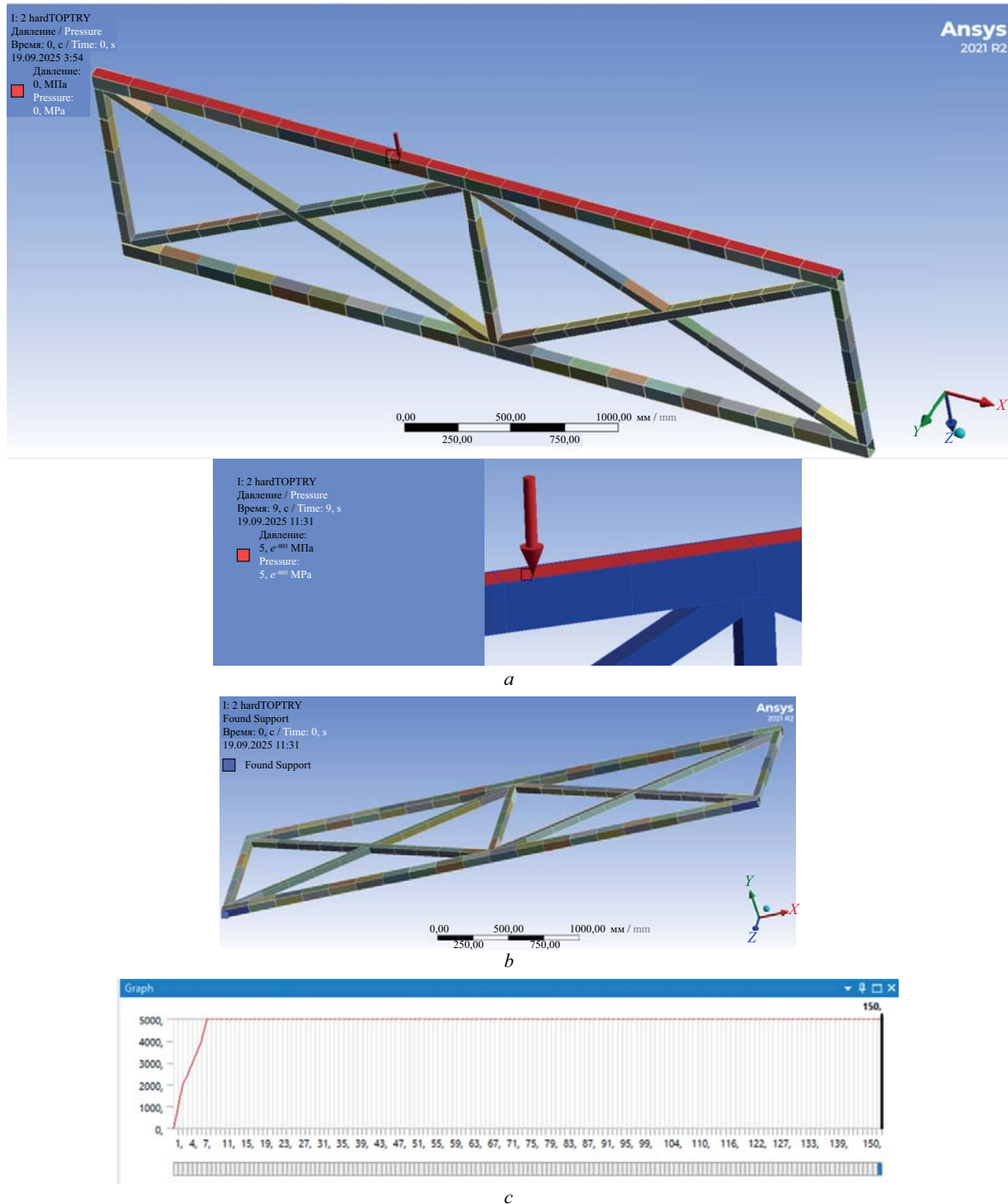


Рис. 2. Пространственная схема ферменной конструкции, визуализация сегментации профилей

Fig. 2. Spatial model of the truss structure and visualization of cross-section segmentation



**Рис. 3.** Схема: *a* — приложения распределенной нагрузки  $q = 5 \text{ кН/м}$  на верхний пояс фермы; *b* — закрепления ферменной конструкции по сегментам, лежащим на опорах; *c* — график приложения нагрузки по времени к верхнему поясу ферменной конструкции

**Fig. 3.** Application scheme: *a* — of the distributed load  $q = 5 \text{ kN/m}$  on the top chord of the truss; *b* — boundary conditions of the truss structure by segments resting on the supports; *c* — load application over time to the top chord of the truss structure

ответствующая нормативным эксплуатационным и снеговым нагрузкам<sup>2</sup>. Нагрузка собрана как погонная при шаге ферм, равном 6 м.

<sup>2</sup> СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07–85\*. М., 2016. 104 с.

Для прогонных ферм следует применять схемы, учитывающие возможность температурных деформаций и соответствующие реальным конструктивным решениям опорных узлов. Заданы граничные условия, соответствующие комбинированному закреплению. Одна опора  $U_{xyz} = 0$  (условно непод-

вижная), вторая опора  $U_y = 0$  (подвижная в горизонтальном направлении) (рис. 3, b).

С целью исключения влияния инерционных сил нагружение задавалось интервально, постепенно увеличиваясь до максимального значения с последующим его сохранением (рис. 3, c).

**Параметры дискретизации конечно-элементной модели**

Для дискретизации геометрической модели использован автоматизированный алгоритм построения сетки. Принято решение об отказе от локального сгущения сетки, поскольку все участки стержневых элементов обладают равной значимостью с точки зрения анализа коррозионной деградации.

Основные параметры генерации сетки:

- базовый размер элементов принят по умолчанию для автоматического алгоритма;
- коэффициент роста размера ячеек 1,1, что обеспечивает плавное изменение размеров смежных элементов.

Тип элементов выбран SHELL181 для тонкостенных профилей.

Результаты контроля качества сетки демонстрируют, что большинство элементов (свыше 95 %) имеют показатель качества выше 0,9 по стандартной метрике ANSYS, что соответствует требованиям для точного статического анализа. Общее количество элементов в модели составило 19 091, что обеспечи-

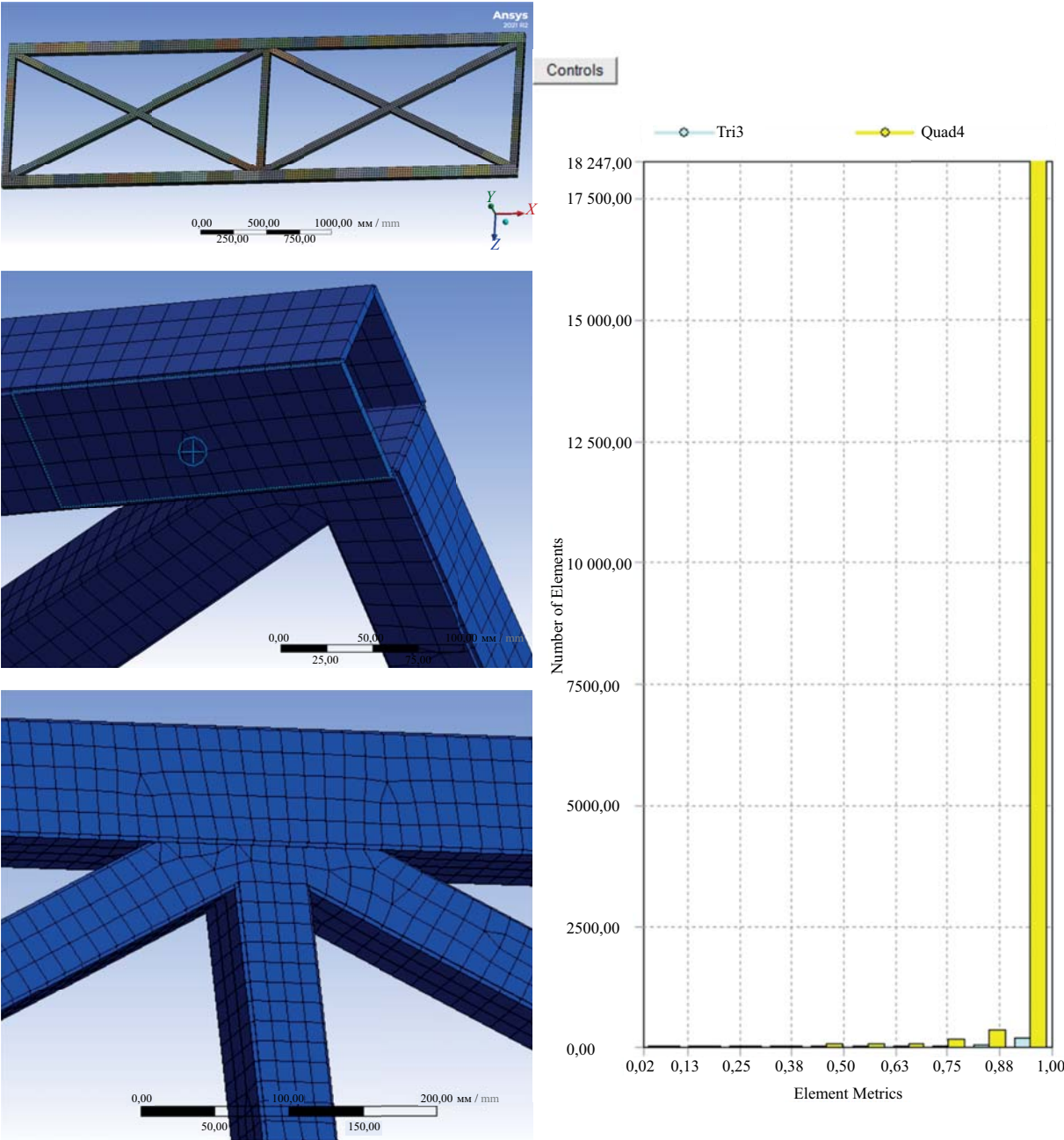


Рис. 4. Визуализация сеточной дискретизации и ее качества

Fig. 4. Visualization of mesh discretization and mesh quality

вает баланс между вычислительной эффективностью и точностью определения локальных напряжений в зонах потенциальной коррозии. Равномерное распределение элементов по всей поверхности профилей позволяет корректно моделировать стохастический характер коррозионных повреждений (рис. 4).

#### Параметры временного интегрирования в квазистатическом анализе

При проведении квазистатического расчета с учетом длительного коррозионного воздействия временные параметры задания нагрузки структурированы следующим образом. В соответствии с экспериментальными данными о кинетике коррозионных процессов в строительных конструкциях, а также на основании исследований остаточного ресурса стальных сооружений принят расчетный период эксплуатации 150 лет и 12 подшагов в пределах каждого основного шага, моделирующих месячные колебания нагрузочных и коррозионных воздействий. Этот интервал принят, чтобы в его пределах выход конструкции из строя реализовался с высокой долей вероятности. Такая детализация временной разбивки позволяет адекватно воспроизвести кумулятивный характер коррозионной деградации материала и ее влияние на несущую способность конструктивной системы в течение всего ЖЦ.

#### Численное моделирование (вероятностный подход к моделированию коррозии)

С целью построения вероятностной модели коррозионной деградации за основу был взят аппарат, разработанный в работе [18], который дает возможность перейти от детерминированного описания к стохастическому прогнозированию.

В основе модели лежит кинетика коррозионного процесса, описываемая степенной зависимостью:

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

где  $C_{(t)}$  — концентрация продуктов коррозии или глубина проникновения;  $A$  и  $B$  — эмпирические коэффициенты, определяющие агрессивность среды и свойства материала.

Для перехода к механическим характеристикам используется модель инициации коррозии (на основе диффузии хлоридов):

$$t_{\text{ин}} = \frac{x^2}{4D \left( \operatorname{erfc}^{-1} \left( \frac{C_{\text{cr}}}{C_0} \right) \right)^2}, \quad (2)$$

где  $x$  — глубина коррозии;  $D$  — коэффициент диффузии хлоридов;  $\operatorname{erfc}^{-1}$  — функция ошибок Гаусса [29];  $C_{\text{cr}}$  — критическая концентрация хлоридов;  $C_0$  — поверхностная концентрация хлоридов.

Рассмотрим стержни корабчатого сечения  $80 \times 60 \times 5$  и  $50 \times 5$ . Тогда исходная площадь для прямоугольного замкнутого профиля с внешними размерами  $b$  (ширина) и  $h$  (высота), толщиной стенки  $s$ :

$$A_0 = 2s(b + h - 2s). \quad (3)$$

Поперечное сечение элементов описывается как временная функция:

$$A_{(t)} = 2 \begin{cases} s(b + h - 2s) & (\text{коррозия не началась}); \\ s - v(t - t_{\text{ин}})[b + h - 2(s - v(t - t_{\text{ин}}))] & \end{cases} \quad (4)$$

где  $A_{(t)}$  — площадь поперечного сечения в момент времени  $t$ , мм<sup>2</sup>;  $s$  — начальная толщина стенки, мм;  $b, h$  — геометрические размеры корабчатого профиля, мм;  $v$  — скорость коррозии, мм/год;  $t_{\text{ин}}$  — время начала коррозии (мес).

В таблице приведена классификация дискретных коррозионных состояний. Выделяют 6 стадий — от нового элемента до потери несущей способности, каждая из которых характеризуется процентом потери сечения.

#### Классификация стадий коррозии

##### Corrosion stage classification

| Стадии коррозии<br>Corrosion stage | Состояние<br>Status                                         | Коэффициент коррозии, %<br>Corrosion loss (cross-section loss), % |
|------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| $S_1$                              | Не коррозионная<br>No corrosion                             | 0                                                                 |
| $S_2$                              | Незначительная коррозия<br>Minor corrosion                  | (0, 1]                                                            |
| $S_3$                              | Умеренная коррозия<br>Moderate corrosion                    | (1, 3]                                                            |
| $S_4$                              | Сильная коррозия<br>Severe corrosion                        | (3, 8]                                                            |
| $S_5$                              | Усиленная коррозия<br>Enhanced corrosion                    | (8, 15]                                                           |
| $S_6$                              | Потеря несущей способности<br>Loss of load-bearing capacity | >15                                                               |

Сформируем граф коррозионных состояний и матрицу вероятностей переходных состояний между ними:

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

Заметим, что:

$$\sum_{\forall \beta} p_{corr(\alpha, \beta)} = 1. \quad (6)$$

Матрица (5) является математическим ядром цепи Маркова. Ее элементы  $p_{corr(i,j)}$  определяют вероятность перехода элемента из состояния  $i$  в состояние  $j$  за один временной шаг. Нулевые вероятности над диагональю отражают необратимость процесса коррозии (переход в лучшее состояние или ремонт не рассматриваются). Важно, что данная матрица не числовая, а функциональная. Значения матрицы определяются в конкретный момент времени. Все это служит прямой математической основой для реализации метода Монте-Карло и последующего перехода к цепям Маркова, что позволяет прогнозировать надежность конструкции в условиях неопределенности.

Проведен поиск пригодных описательных моделей для исходных данных. Для определения вероятностей переходных состояний изначально подбирались математические распределения, которые наиболее точно описывали бы распределения, принятые в исследовании [26]. Оценкой качества выступал коэффициент детерминации. Физическая интерпретация основана на концепции коррозионного процесса как последовательности дискретных переходов между состояниями с различной степенью повреждения. Каждый переход представляет собой акт ускоренной потери сечения, механизм которого качественно аналогичен на всех стадиях деградации,

но реализуется в условиях различного начального состояния материала и остаточной несущей способности [28].

### Вероятностное моделирование деградации единичного стержня

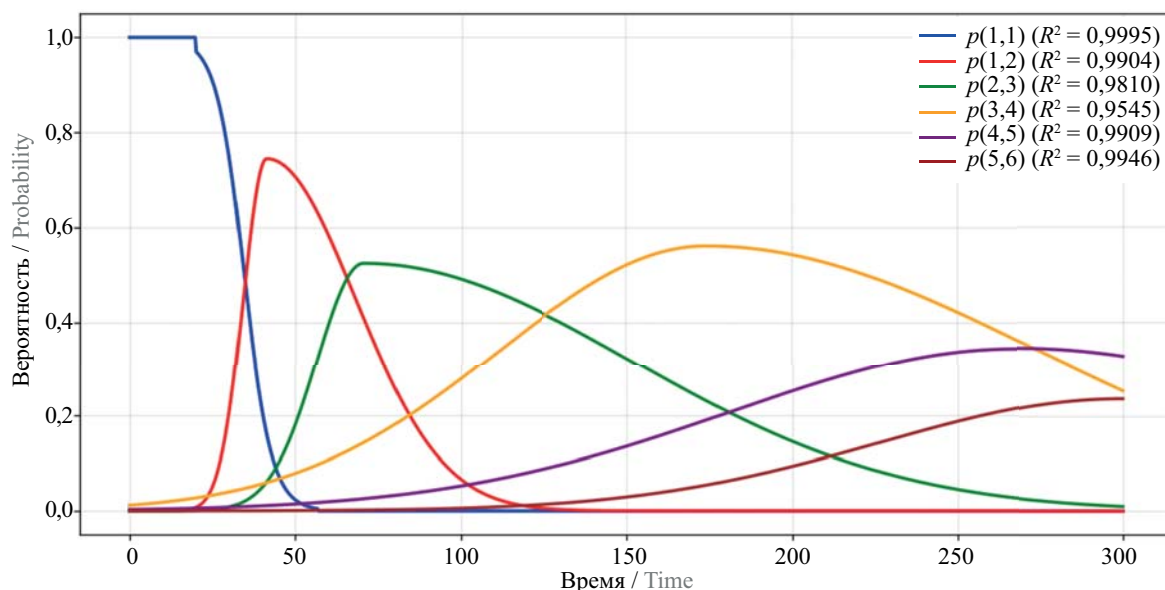
После верификации аппроксимирующих функций распределения выполнено построение интегрального вероятностно-временного графика, удовлетворяющего условию нормировки  $\sum_{\forall \beta} p_{corr(\alpha, \beta)} = 1$ , для любого момента времени  $t \in [0, T]$ , где  $T$  — расчетный период эксплуатации. Для статистического моделирования траекторий коррозионной деградации применен метод Монте-Карло, реализованный по следующей схеме:

1. В каждый дискретный момент времени  $t_i$  генерируется случайная величина  $\xi \sim U(0, 1)$ , распределение которой подобно распределению наиболее выраженному в данный момент времени  $t_i$  на временном пространстве.

2. Путем сравнения значения  $\xi$  с кумулятивными вероятностями состояний осуществляется отнесение элемента к одному из возможных коррозионных состояний  $S_i$ .

Таким образом осуществляется наработка данных на числе симуляций, равном 10 000.

С целью генерации случайных чисел использованы параметризованные распределения, наилучшим образом описывающие экспериментальные данные по начальным переходам. Указанный под-



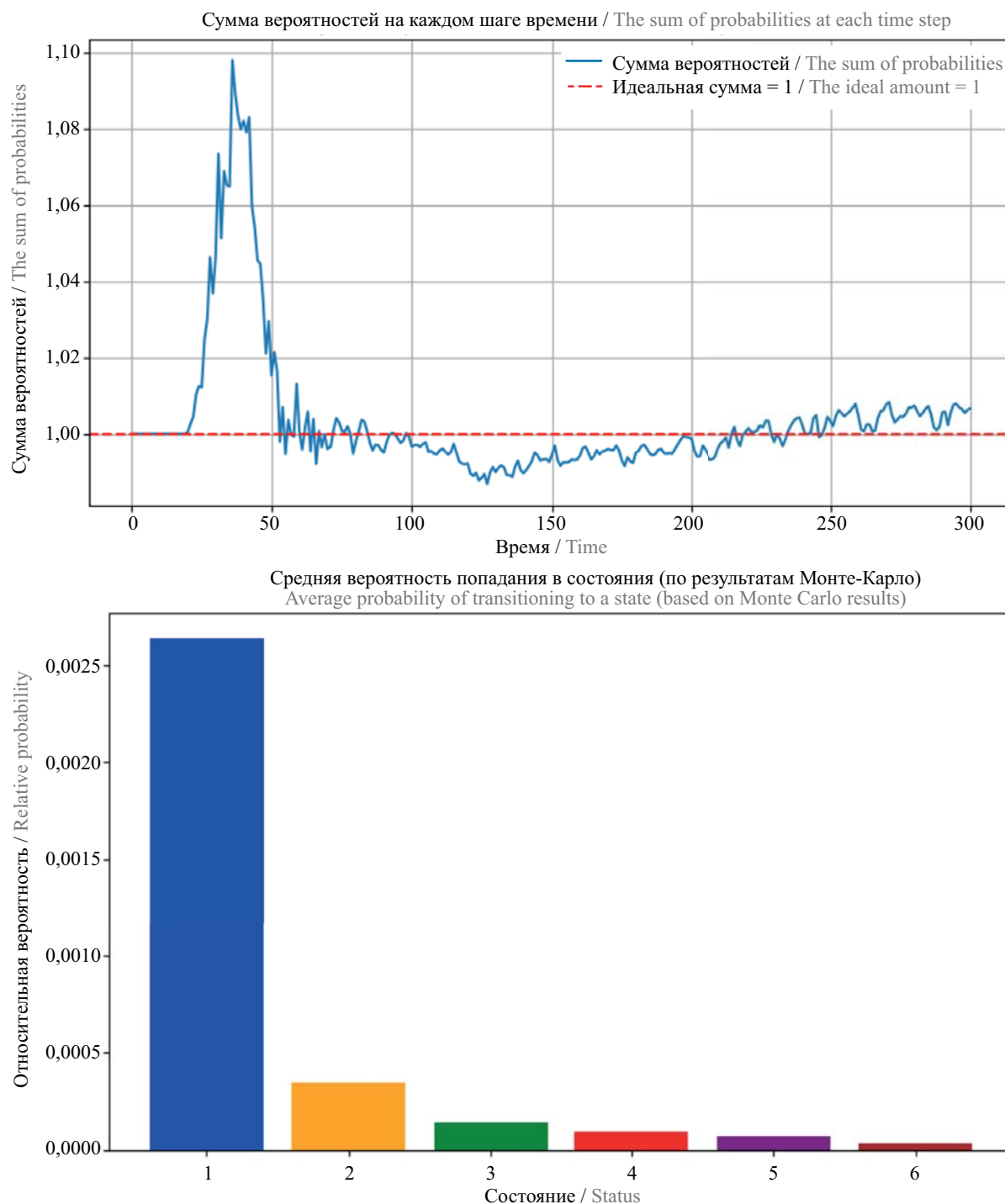


Рис. 5. Результаты реализации метода Монте-Карло для единичного элемента при  $10^4$  испытаний

Fig. 5. Monte Carlo simulation results for a single member with  $(10^4)$  trials

ход позволяет получить репрезентативную выборку реализаций случайного процесса коррозионной деградации и статистически оценить вероятности нахождения элемента в различных состояниях в произвольный момент времени.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На основе  $10^4$  независимых реализаций метода Монте-Карло получены временные ряды вероят-

ностей состояний и построены гистограммы времени достижения критических состояний (рис. 5). Установлено, что коэффициент вариации времен переходов между состояниями не превышает 15 %, что подтверждает адекватность предложенной вероятностной модели и позволяет перейти к анализу полной ферменной конструкции.

Реализация разработанной вероятностной модели коррозионной деградации выполнена посредством специализированного скрипта на языке Python,



Рис. 6. Реализация вероятностной модели деградации металла ферменных элементов в ANSYS Mechanical  
Fig. 6. Implementation of the probabilistic degradation model for truss members in ANSYS Mechanical

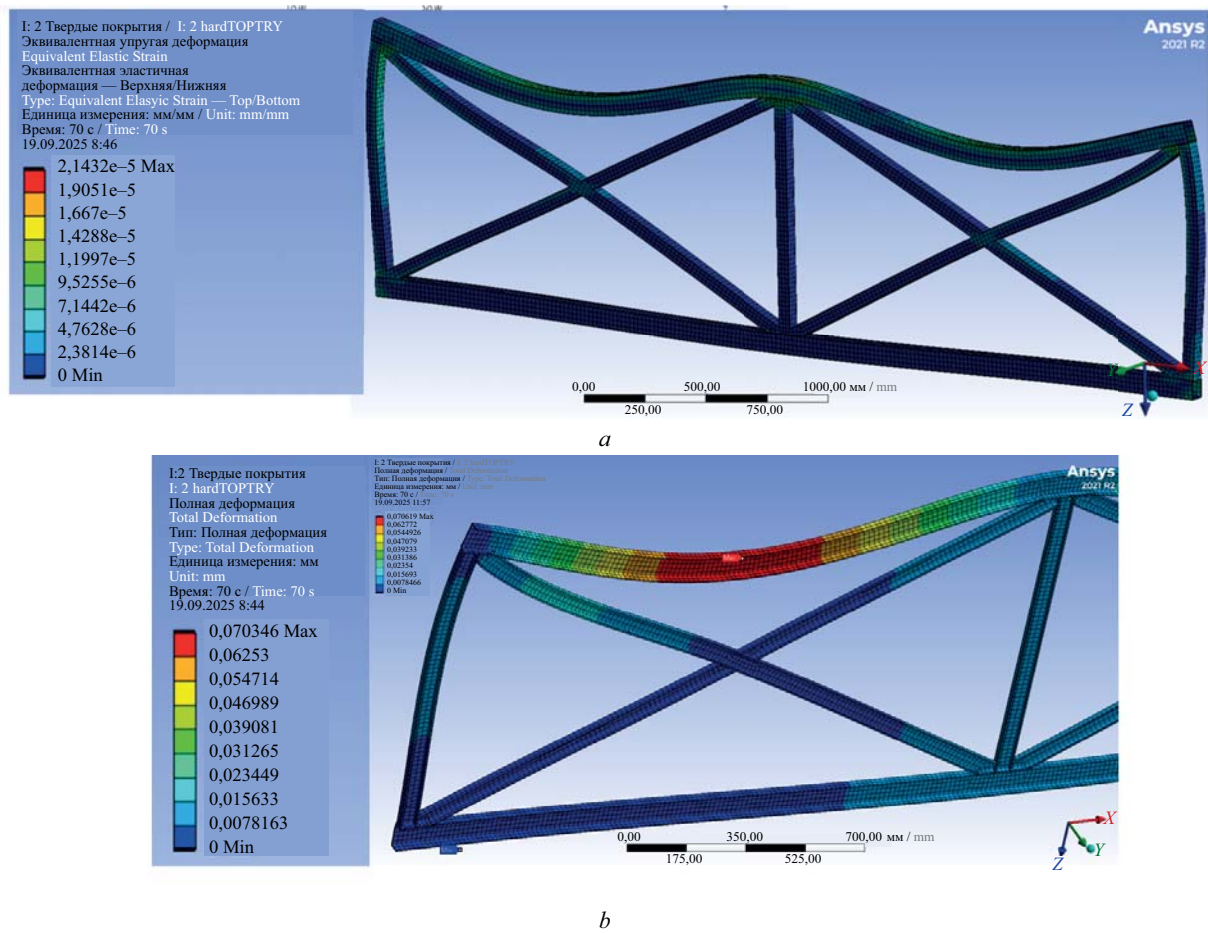


Рис. 7. Поля эквивалентных напряжений по Мизесу ( $t = 70$  лет) (a); поле полных деформаций в ферменной конструкции ( $t = 70$  лет) (b)  
Fig. 7. Von Mises equivalent stress field ( $t = 70$  years) (a); total strain field in the truss structure ( $t = 70$  years) (b)

интегрированного с платформой ANSYS Mechanical (рис. 6). Алгоритм работы скрипта включает следующие операции:

- на каждом временном шаге  $t_i$  к толщине каждого сегмента стенки профиля применяется функ-

ция вероятностной деградации, основанная на графе переходных состояний;

- автоматическая регенерация сетки конечных элементов после изменения геометрических параметров.

Данная методика дает возможность воспроизвести пространственно неоднородный характер коррозионного износа на протяжении всего ЖЦ конструкции. Визуализация результатов расчета демонстрирует существенное изменение картины распределения эквивалентных напряжений по мере уменьшения толщины стенок профилей, что отражает перераспределение усилий в элементах ферменной системы.

В результате численного моделирования получены комплексные сведения о напряженно-деформированном состоянии ферменной конструкции. На рис. 7 представлены поля эквивалентных напряжений по Мизесу и деформаций, демонстрирующие пространственное распределение силовых факторов в элементах системы.

Для верификации предложенной методики выполнен анализ на временном срезе  $t = 70$  лет, соответствующий периоду активного развития коррозионных повреждений. Полученная картина напряженного состояния демонстрирует корректность решения кра-

евой задачи с использованием разработанного алгоритма деградации металлических профилей.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Реализована верификация модели в ПК ANSYS Mechanical с использованием метода Монте-Карло. Результаты анализа для временного горизонта 70 лет демонстрируют:

- запас прочности 2,8 при нормативном значении 1,5;
- вероятность отказа менее  $10^{-4}$  при допустимом значении  $10^{-3}$ ;
- остаточный ресурс более 25 лет.

Коэффициент вариации времен переходов между состояниями (5–15 %) свидетельствует о высокой предсказуемости коррозионного процесса в рамках предложенной модели. Разработанная методика позволяет перейти от консервативных детерминированных оценок к точным количественным прогнозам, что обеспечивает оптимизацию сроков и объемов ремонтных работ при гарантированном выполнении требований безопасности.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Перельмутер А.В.* Избранные проблемы надежности и безопасности строительных конструкций. М. : АСВ, 2007. 255 с. EDN QNMXBJ.
2. *Тамразян А.Г., Мацеевич Т.А., Савин С.Ю.* Оценка технического состояния несущих конструкций зданий на основе прогнозирования риска аварии // Строительство и реконструкция. 2024. № 6 (116). С. 82–91. DOI: 10.33979/2073-7416-2024-116-6-82-91. EDN EQZYKS.
3. *Дормидонтова Т.В., Солкарян Н.Г.* Оптимизация надежности строительных конструкций // Пути улучшения качества автомобильных дорог : сборник статей. 2015. С. 87–92. EDN TWPPXZ.
4. *Меркулов С.И.* Развитие теории конструктивной безопасности объектов в условиях коррозионных воздействий // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2014. № 3. С. 44–46. EDN SGFDVL.
5. *Морозов В.И., Анцыгин О.И., Савченко А.П.* Расчет и моделирование работы строительных конструкций с коррозионными повреждениями // Вестник гражданских инженеров. 2009. № 1 (18). С. 25–30. EDN JXOKEJ.
6. *Овчинников И.И., Овчинников И.Г.* Нелинейная механика конструкций, взаимодействующих с агрессивными средами и физическими полями : монография. Уфа : Изд-во УГНТУ, 2024. 290 с.
7. *Stewart M.G., Al-Harthy A.* Pitting corrosion and structural reliability of corroding RC structures: Experimental data and probabilistic analysis // Reliability Engineering & System Safety. 2008. Vol. 93. Issue 3. Pp. 373–382. DOI: 10.1016/j.ress.2006.12.013
8. *Chernin L., Val D.V.* Prediction of corrosion-induced cover cracking in reinforced concrete structures // Construction and Building Materials. 2011. Vol. 25. Issue 4. Pp. 1854–1869. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.11.074
9. *Тамразян А.Г., Мацеевич Т.А.* Надежностная оптимизация конструкций с учетом неопределенностей при проектировании // Актуальные проблемы строительной отрасли и образования – 2022 : сб. докл. Третьей Национальной науч. конф. 2023. С. 50–54. EDN UPVVFT.
10. *Melchers R.E., Beck A.T.* Structural Reliability Analysis and Prediction. 3rd ed. Wiley, 2017. 472 p. DOI: 10.1002/9781119266105
11. *Val D.V., Chernin L., Stewart M.G.* Experimental and numerical investigation of corrosion-induced cover cracking in reinforced concrete structures // Journal of Structural Engineering. 2009. Vol. 135. Issue 4. Pp. 376–385. DOI: 10.1061/(asce)0733-9445(2009)135:4(376)
12. *Biondini F., Vergani M.* Deteriorating beam finite element for nonlinear analysis of concrete structures under corrosion // Structure and Infrastructure Engineering. 2015. Vol. 11. Issue 4. Pp. 519–532. DOI: 10.1080/15732479.2014.951863
13. *Vu K.A.T., Stewart M.G.* Structural reliability of concrete bridges including improved chloride-induced corrosion models // Structural Safety. 2000.

Vol. 22. Issue 4. Pp. 313–333. DOI: 10.1016/s0167-4730(00)00018-7

14. Biondini F., Camnasio E., Palermo A. Life-time seismic performance of concrete bridges exposed to corrosion // *Structure and Infrastructure Engineering*. 2014. Vol. 10. Issue 7. Pp. 880–900. DOI: 10.1080/15732479.2012.761248

15. Соловьева А.А., Соловьев С.А. Исследования развития моделей случайных величин в расчетах надежности строительных конструкций при неполной статистической информации // *Вестник МГСУ*. 2021. Т. 16. №. 5. С. 587–607. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.5.587-607. EDN VJCFGH.

16. Kumar R., Gardoni P., Sanchez-Silva M. Effect of cumulative seismic damage and corrosion on the life-cycle cost of reinforced concrete bridges // *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 2009. Vol. 38. Issue 7. Pp. 887–905. DOI: 10.1002/eqe.873

17. Frangopol D.M., Kim S. Service life, reliability and maintenance of civil structures // *Service Life Estimation and Extension of Civil Engineering Structures*. 2011. Pp. 145–178. DOI: 10.1533/97808-57090928.2.145

18. 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. Issue 2. Pp. 308–320. DOI: 10.1016/j.pro bengmech.2010.08.009. EDN OELPXH.

19. Darmawan M.S., Stewart M.G. Spatial time-dependent reliability analysis of corroding pretensioned prestressed concrete bridge girders // *Structural Safety*. 2007. Vol. 29. Issue 1. Pp. 16–31. DOI: 10.1016/j.strusafe.2005.11.002

20. Mori Y., Ellingwood B.R. Reliability-based service-life assessment of aging concrete structures // *Journal of Structural Engineering*. 1993. Vol. 119. Issue 5. Pp. 1600–1621. DOI: 10.1061/(asce)0733-9445(1993)119:5(1600)

21. Давыдов А.Н. Цепь Маркова как математическая модель строительной конструкции, работа-

ющей под нагрузкой // *Градостроительство и архитектура*. 2017. Т. 7. № 1 (26). С. 4–8. DOI: 10.17673/Vestnik.2017.01.1. EDN YRDUAZ.

22. Rodriguez J., Ortega L.M., Casal J. Load carrying capacity of concrete structures with corroded reinforcement // *Construction and Building Materials*. 1997. Vol. 11. Issue 4. Pp. 239–248. DOI: 10.1016/s0950-0618(97)00043-3

23. Tuutti K. Corrosion of Steel in Concrete. Stockholm : Swedish Cement and Concrete Research Institute, 1982. 469 p.

24. Val D.V., Stewart M.G. Life-cycle cost analysis of reinforced concrete structures in marine environments // *Structural Safety*. 2003. Vol. 25. Issue 4. Pp. 343–362. DOI: 10.1016/s0167-4730(03)00014-6

25. O'Connor A.J., Kenshel O. Experimental evaluation of the scale of fluctuation for spatial variability modeling of chloride-induced reinforced concrete corrosion // *Journal of Bridge Engineering*. 2013. Vol. 18. Issue 1. Pp. 3–14. DOI: 10.1061/(asce)be.1943-5592.0000370

26. Straub D. Stochastic modeling of deterioration processes through dynamic Bayesian networks // *Journal of Engineering Mechanics*. 2009. Vol. 135. Issue 10. Pp. 1089–1099. DOI: 10.1061/(asce)em.1943-7889.0000024

27. Kwon K., Frangopol D.M. Bridge fatigue reliability assessment using probability density functions of equivalent stress range based on field monitoring data // *International Journal of Fatigue*. 2010. Vol. 32. Issue 8. Pp. 1221–1232. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2010.01.002

28. Matseevich T.A., Dankov S.A. Probabilistic Approach of State Transition Elements of Truss Structures at Corrosion // *E3S Web of Conferences*. 2024. Vol. 535. P. 01003. DOI: 10.1051/e3sconf/202453501003

29. Мацевич Т.А., Андреев И.Ф. Конечно-элементная модель диффузии хлорида в предварительно напряженной корродированной арматуре железобетонных конструкций // *Вестник МГСУ*. 2022. Т. 17. № 11. С. 1462–1470. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.11.1462-1470. EDN VXJBVQ.

Поступила в редакцию 19 декабря 2025 г.

Принята в доработанном виде 31 марта 2026 г.

Одобрена для публикации 31 марта 2026 г.

ОБ АВТОРАХ: Татьяна Анатольевна Мацевич — доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры высшей математики; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 1299-6980, Scopus: 51461741900, ORCID: 0000-0001-6292-0759; MatseevichTA@mgsu.ru;

Савелий Андреевич Данков — аспирант кафедры высшей математики; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 7754-0683; olimp.botek@mail.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## REFERENCES

1. Perel'muter A.V. *Selected problems of reliability and safety of building structures*. Moscow, ASV, 2007; 255. EDN QNMXBJ. (rus.).
2. Tamrazyan A.G., Matseevich T.A., Savin S.Yu. Assessment of the technical condition of load-bearing structures of buildings based on accident risk forecasting. *Building and Reconstruction*. 2024; 6(116):82-91. DOI: 10.33979/2073-7416-2024-116-6-82-91. EDN EQZYKS. (rus.).
3. Dormidontova T.V., Solkaryan N.G. Optimization of structural reliability. *Ways to Improve Road Quality*. 2015; 87-92. EDN TWPPXZ. (rus.).
4. Merkulov S.I. Development of the theory of structural safety of facilities under corrosion impacts. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2014; 3:44-46. EDN SGFDVL. (rus.).
5. Morozov V.I., Antsygin O.I., Savchenko A.P. Calculating and modeling the operation of structures with corrosion damages. *Bulletin of Civil Engineers*. 2009; 1(18):25-30. EDN JXOKEJ. (rus.).
6. Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G. *Nonlinear mechanics of structures interacting with aggressive environments and physical fields : monograph*. Ufa, Izd-vo UGNTU, 2024; 290. (rus.).
7. Stewart M.G., Al-Harthi A. Pitting corrosion and structural reliability of corroding RC structures: Experimental data and probabilistic analysis. *Reliability Engineering & System Safety*. 2008; 93(3):373-382. DOI: 10.1016/j.ress.2006.12.013
8. Chernin L., Val D.V. Prediction of corrosion-induced cover cracking in reinforced concrete structures. *Construction and Building Materials*. 2011; 25(4): 1854-1869. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.11.074
9. Tamrazyan A.G., Matseevich T.A. Reliability optimization of structures taking into account uncertainties in design. *Actual problems of the construction industry and education – 2022 : collection of reports of the Third National Scientific Conference*. 2023; 50-54. EDN UPVVFT. (rus.).
10. Melchers R.E., Beck A.T. *Structural Reliability Analysis and Prediction*. 3rd ed. Wiley, 2017; 472. DOI: 10.1002/9781119266105
11. Val D.V., Chernin L., Stewart M.G. Experimental and numerical investigation of corrosion-induced cover cracking in reinforced concrete structures. *Journal of Structural Engineering*. 2009; 135(4):376-385. DOI: 10.1061/(asce)0733-9445(2009)135:4(376)
12. Biondini F., Vergani M. Deteriorating beam finite element for nonlinear analysis of concrete structures under corrosion. *Structure and Infrastructure Engineering*. 2015; 11(4):519-532. DOI: 10.1080/15732479.2014.951863
13. Vu K.A.T., Stewart M.G. Structural reliability of concrete bridges including improved chloride-induced corrosion models. *Structural Safety*. 2000; 22(4):313-333. DOI: 10.1016/s0167-4730(00)00018-7
14. Biondini F., Camnasio E., Palermo A. Lifetime seismic performance of concrete bridges exposed to corrosion. *Structure and Infrastructure Engineering*. 2014; 10(7):880-900. DOI: 10.1080/15732479.2012.761248
15. Soloveva A.A., Solovev S.A. A research into the development of models of random variables as part of the structural reliability analysis performed in the absence of some statistical information. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2021; 16(5):587-607. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.5.587-607. EDN VJCFGH. (rus.).
16. Kumar R., Gardoni P., Sanchez-Silva M. Effect of cumulative seismic damage and corrosion on the life-cycle cost of reinforced concrete bridges. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 2009; 38(7):887-905. DOI: 10.1002/eqe.873
17. Frangopol D.M., Kim S. Service life, reliability and maintenance of civil structures. *Service Life Estimation and Extension of Civil Engineering Structures*. 2011; 145-178. DOI: 10.1533/9780857090928.2.145
18. 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.probengmech.2010.08.009. EDN OELPXH.
19. Darmawan M.S., Stewart M.G. Spatial time-dependent reliability analysis of corroding pretensioned prestressed concrete bridge girders. *Structural Safety*. 2007; 29(1):16-31. DOI: 10.1016/j.strusafe.2005.11.002
20. Mori Y., Ellingwood B.R. Reliability-based service-life assessment of aging concrete structures. *Journal of Structural Engineering*. 1993; 119(5):1600-1621. DOI: 10.1061/(asce)0733-9445(1993)119:5(1600)
21. Davydov A.N. Markov chain as a mathematical model of building structure working under load. *Urban Construction and Architecture*. 2017; 7(1): (26):4-8. DOI: 10.17673/Vestnik.2017.01.1. EDN YRDUAZ. (rus.).
22. Rodriguez J., Ortega L.M., Casal J. Load carrying capacity of concrete structures with corroded reinforcement. *Construction and Building Materials*. 1997; 11(4):239-248. DOI: 10.1016/s0950-0618(97)00043-3
23. Tuutti K. *Corrosion of Steel in Concrete*. Stockholm, Swedish Cement and Concrete Research Institute, 1982; 469.
24. Val D.V., Stewart M.G. Life-cycle cost analysis of reinforced concrete structures in marine environments. *Structural Safety*. 2003; 25(4):343-362. DOI: 10.1016/s0167-4730(03)00014-6
25. O'Connor A.J., Kenshel O. Experimental evaluation of the scale of fluctuation for spatial variability modeling of chloride-induced reinforced concrete corro-

sion. *Journal of Bridge Engineering*. 2013; 18(1):3-14. DOI: 10.1061/(asce)be.1943-5592.0000370

26. Straub D. Stochastic modeling of deterioration processes through dynamic Bayesian networks. *Journal of Engineering Mechanics*. 2009; 135(10):1089-1099. DOI: 10.1061/(asce)em.1943-7889.0000024

27. Kwon K., Frangopol D.M. Bridge fatigue reliability assessment using probability density functions of equivalent stress range based on field monitoring data. *International Journal of Fatigue*. 2010; 32(8):1221-1232. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2010.01.002

28. Matseevich T.A., Dankov S.A. Probabilistic Approach of State Transition Elements of Truss Structures at Corrosion. *E3S Web of Conferences*. 2024; 535:01003. DOI: 10.1051/e3sconf/202453501003

29. Matseevich T.A., Andreev I. F The finite element model of chloride diffusion in pre-stressed corroded reinforcement bars of reinforced concrete structures. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(11):1462-1470. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.11.1462-1470. EDN VXJBVQ. (rus.).

*Received December 19, 2025.*

*Adopted in revised form on March 31, 2026.*

*Approved for publication on March 31, 2026.*

**B I O N O T E S :** **Tatyana A. Matseevich** — Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Higher Mathematics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 1299-6980, Scopus: 51461741900, ORCID: 0000-0001-6292-0759; MatseevichTA@mgsu.ru;

**Saveliy A. Dankov** — postgraduate student of the Department of Higher Mathematics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 7754-0683; olimp.botek@mail.ru.

*Authors' contributions: all authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.*

*The authors declare no conflicts of interest.*