

Научная статья

УДК 624.014+624.046+627.2+691.714

DOI: <https://doi.org/10.25686/2542-114X.2024.1.58>

EDN: LPXELJ

Особенности расчета надежности поврежденных стальных конструкций

М. А. Алейникова, Н. Ю. Сойту[✉]

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (г. Санкт-Петербург)
natali_s01@mail.ru[✉]

Аннотация. *Введение.* Конструкционная сталь в силу высокой прочности, малого собственного веса и превосходных сейсмических характеристик широко используется в промышленных зданиях и сооружениях. Например, непрерывные стальные балки, состоящие из двух и более пролетов, обычно применяются в каркасных зданиях и мостах. Их конструкция не только обеспечивает условие прочности, но и минимизирует их массу и материальные затраты. Однако вследствие воздействия окружающей среды стальные конструкции подвергаются коррозии. Из-за накопления коррозионных повреждений снижаются несущая способность стальных конструкций и уровень безопасности их эксплуатации. Поэтому одной из основных задач в области строительства является обеспечение надежности и долговечности стальных конструкций при процессе их эксплуатации. Основными вариантами решения этой задачи являются управление эксплуатационным сроком службы зданий и сооружений в реальных средах, правильный выбор конструктивных и технологических решений при усилении существующей конструкции.

Цель статьи – рассмотрение особенностей расчета надежности поврежденных стальных конструкций.

В ходе работы использовались следующие *методы*: математическое моделирование, прогнозирование, систематизация, экспериментальные исследования, обобщение.

Результаты. Для оценки надежности стальной конструкции в зависимости от срока ее службы, воздействия агрессивной внешней среды и старения самого металла представляется целесообразным принимать во внимание предыдущую историю ее работы, а также использовать комбинацию метода Монте-Карло (МК) и метода конечных элементов (МКЭ), которые дают возможность оценить коррозионные потери поперечного сечения стальной балки. Предыдущую историю накопленной усталости материала предлагается определять через левостороннее усечение кривой нормального распределения Гаусса случайной величины сопротивления. Атмосферная коррозия металлов – сложный процесс, зависящий от большого числа взаимодействующих факторов окружающей среды. Для оценки коррозионных потерь, глубины коррозии предлагается использовать модель, в которой учтены влияние диоксида серы через его концентрацию и скорость осаждения хлоридов. В качестве имитационного моделирования выбран метод Монте-Карло, который адаптирован к определению вероятности ненадежности систем стальных конструкций; приведен алгоритм этого определения.

Выводы. Представлен подход к оценке надежности непрерывной стальной балки в зависимости от времени ее службы и с учетом коррозионного воздействия атмосферной окружающей среды на базе комбинации методов МК и МКЭ.

Ключевые слова: стальная конструкция; надежность; коррозия; повреждение; узел; метод Монте-Карло; метод конечных элементов

Финансирование: авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Для цитирования: Алейникова М. А., Сойту Н. Ю. Особенности расчета надежности поврежденных стальных конструкций // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. 2024. № 1 (29). С. 58–65. DOI: <https://doi.org/10.25686/2542-114X.2024.1.58>; EDN: LPXELJ

Введение

Конструкционная сталь – это материал, широко используемый в заводских зданиях, обладающий высокой прочностью, малым собственным весом и превосходными сейсмическими характеристиками [1]. Например, непрерывные стальные балки, состоящие из двух и более пролетов, обычно используются в каркасных зданиях и мостах. Их конструкция не только обеспечивает условие прочности, но и минимизирует их массу и материальные затраты. Однако, как известно, стальные конструкции подвергаются коррозии под воздействием окружающей среды. В результате несущая способность и, следовательно, уровень их безопасности со временем снижаются из-за накопления коррозионных повреждений (например, потери сечения). Уровень неопределенности в отношении характеристик конструкции возрастает из-за нечеткости, присущей процессу разрушения. Скорость коррозии часто неравномерна и трудно предсказуема [2, 3].

В связи с этим следует отметить, что одной из основных задач в области строительства является обеспечение надежности и долговечности стальных конструкций при процессе их эксплуатации. Основными вариантами решения этой задачи являются управление эксплуатационным сроком службы зданий и сооружений в реальных средах, правильный выбор конструктивных и технологических решений при усилении существующей конструкции [4].

Оценка надежности и долговечности стальных элементов при коррозии металла вызывает интерес многих исследований. Учеными разработаны различные методы оценки надежности конструктивных элементов и систем, а также подходы к расчету приближенных границ вероятности отказа металлических конструкций. Однако, несмотря на имеющиеся труды и наработки, сегодня эта

проблема изучена еще недостаточно и поэтому требует дальнейшего исследования. Дополнительную ценность имеют попытки теоретического определения возможного воздействия агрессивной среды на металлические конструкции, это позволило бы не проводить сложные экспериментальные испытания.

Итак, обозначенные обстоятельства предопределили выбор темы данной статьи.

Особенности использования модельных представлений стальных конструкций и уравнений механического состояния материалов, которые в формализованном виде отражают результат воздействия внешней среды, описаны в работах И. Т. Мирсаяпова [5], А. Р. Туснина [6], А. А. Соловьевой [7], В. С. Сафронова [8], С. С. Мехтиева [9], В. П. Королева [10], В. Д. Райзера [11].

Алгоритм оценки технического состояния стальной фермы, в ходе которого производится комплекс работ по установлению фактического износа конструкций и определению соответствия нагрузкам и воздействиям, представлен в трудах Д. И. Королькова [12], Н. А. Бузало [13], Д. Н. Кузнецова [14], Е. А. Чайкина [15], Ю. Л. Виноградовой [16], Т. А. Паутовой [17], В. А. Шорина [18], И. И. Ведякова и Д. В. Соловьева [19].

Отдавая должное накопленному на сегодняшний день научному наследию и экспериментальному опыту, отметим, что ряд вопросов требует более пристального внимания. Так, в развитии нуждается методологический подход к определению несущей способности стальных конструкций в результате воздействия агрессивной среды, в том числе в условиях изменения климата. Особого внимания заслуживает разработка инженерной методики расчета таких конструкций, преимуществом которой должна стать простота в использовании и учет требований действующих нормативных документов.

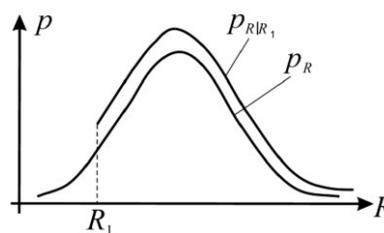
Цель работы заключается в рассмотрении особенностей расчета надежности поврежденных стальных конструкций.

В ходе работы использовались следующие **методы**: математическое моделирование, прогнозирование, систематизация, экспериментальные исследования, обобщение.

Результаты исследования

Для оценки надежности стальной конструкции в зависимости от срока ее службы, воздействия агрессивной внешней среды и старения самого металла представляется целесообразным принимать во внимание предыдущую историю ее работы, а также использовать комбинацию метода Монте-Карло (МК) и метода конечных элементов (МКЭ), которые дают возможность оценить коррозионные потери поперечного сечения стальной балки.

Итак, пусть известно, что в процессе предварительной эксплуатации конструкции был достигнут определенный уровень внутренних усилий в элементах системы, которому соответствовало сопротивление R_1 , отказы в данном случае не наблюдались. При этом можно принять во внимание, что происходит левостороннее усечение кривой распределения случайной величины сопротивления, и, таким образом, считать, что в рассматриваемой конструкции фактически отсутствует вероятность встретить величину расчетного сопротивления меньше чем R_1 . Другими словами, в расчет принимаются только такие параметры сопротивления, для которых выполняется условие $R \geq R_1$. Подходящая кривая плотности вероятности p_R превращается в кривую $p_{R|R_1}$ (см. рисунок).



Эффект левостороннего усечения [18]
The effect of left-sided truncation [18]

Безусловно, можно считать, что напряжения R_1 соответствуют значениям, возникающим под влиянием действия зафиксированной постоянной нагрузки. Могут учитываться и напряжения от других нагрузок, если существуют заслуживающие доверия данные, которые свидетельствуют о самих фактах реализации таких нагрузок и содержат достоверные сведения относительно их фактических характеристик. Если используется левостороннее усечение, то кривая плотности при $R \geq R_1$ имеет вид

$$p_{R|R_1}(R) = \mu_R \cdot p_R(R),$$

где коэффициент усечения

$$\mu_R = \frac{1}{1 - \int_0^{R_1} p_R(x) dx} = \frac{1}{1 - P_{R_1}(R)}$$

Тогда общий вид формулы для расчета вероятности безотказной работы стальной конструкции принимает форму

$$P_{R|R_1} = \int_{R_1}^{\infty} p_R(x) P_s(S) dx,$$

где $P_s(S)$ – интегральная функция распределения усилия.

Интеграл в этом выражении может быть трансформирован следующим образом:

$$P_{R|R_1} = \int_{R_1}^{\infty} p_{R|R_1}(R) \left[\int_0^R p_s(x) dx \right] dR = \mu_R \left[\int_0^{\infty} p_R(R) P_s(S) dR - \int_0^{R_1} p_R(y) P_s(S) dy \right] = \mu_R [P_s - P_{s,1}],$$

где P_s – вероятность безотказного состояния при отсутствии усечения;

$P_{s,1}$ – вероятность безотказного состояния при сопротивлениях $R \geq R_1$.

Атмосферная коррозия металлов – сложный процесс, зависящий от большого числа взаимодействующих факторов окружающей среды [20]. Для оценки коррозионных потерь предлагаем использовать следующую модель:

$$d(t) = At^B \left(\frac{TOW}{C} \right)^D \cdot \left(1 + \frac{[SO_2]}{E} \right)^F \times \left(1 + \frac{[Cl]}{G} \right)^H e^{j(T+T_0)},$$

где $d(t)$ – глубина коррозии, мкм;

t – время выдержки, годы;

TOW – время увлажнения, ч/год;

$[SO_2]$ – концентрация диоксида серы, мкг/м³;

$[Cl]$ – скорость осаждения хлоридов, мкг/м²/сут;

T – температура выдержки, °С;

T_0 – эмпирический коэффициент;

$A, B, C, D, E, F, G, H, J$ – численные значения, установленные в ходе испытаний.

Метод имитационного моделирования МК основан на использовании псевдослучайных чисел и закона больших чисел для оценки надежности любой системы [21-23]. Если безопасная область определяется условием $f(X) > 0$, где X – случайный вектор, содержащий все входные случайные величины, то вероятность ненадежности системы можно вычислить следующим образом:

$$P_f = \int I_{f(X)<0} f_x(x) dx = E[I_{f(X)<0}],$$

где $I_{f(X)<0}$ – индикаторная функция:

$$I_{f(X)<0} = \begin{cases} 1, & \text{если } f(X) < 0; \\ 0, & \text{если } f(X) \geq 0. \end{cases}$$

Расчетная программа для оценки надежности стальной балки непрерывного сечения была разработана с использованием МКЭ, модели коррозии с входными параметрами, основанными на сценарии изменения климата, и МК-имитации.

Оценка надежности сплошной стальной балки проводилась для различных длительностей коррозии – 10, 20, 50 и 100 лет. Обобщенные значения вероятности безопасности при моделировании МК непрерывной стальной балки с учетом коррозии ее металла приведены в таблице.

Вероятность безопасности непрерывной стальной балки

The probability of safety of a continuous steel beam

Годы	0	10	20	50	100
Вероятность безопасности (%)	96,77	81,44	75,91	68,61	63,08

Вывод

В статье представлен подход к оценке надежности непрерывной стальной балки в зависимости от времени ее службы и с учетом коррозионного воздействия изменения климата на базе комбинации МК и МКЭ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lin Youzhu. Theoretical models and reliability assessment of steel-UHPC-steel composite beams in offshore structures // Ocean engineering. 2023. P. 78-84.

2. Лукин Е. К., Себешев В. Г. Надежность и долговечность трубчатых элементов стальных конструкций при коррозионных повреждениях // Фундаментальные и прикладные вопросы транспорта. 2023. № 2 (9). С. 78-84.

3. Tran Ngoc-Long, Phan Van-Phuc, Valeriy Morozov. Investigation the corrosion initiation

process in reinforced concrete structures under the impact of climate change // Architecture and engineering. 2021. Vol. 6, no. 2. P. 37-44.

4. Надольский В. В. Коэффициенты надежности для нелинейных моделей несущей способности балок с гибкой стенкой // Вестник МГСУ. 2023. № 6. С. 852-863.

5. Мирсаяпов И. Т. Исследование напряженно-деформированного состояния сталежелезобетонных балок с частичной заделкой двутавровых сечений в бетоне // Известия Казанского государ-

ственного архитектурно-строительного университета. 2022. № 3 (61). С. 56-66.

6. Туснин А. Р. Численный расчет сталежелезобетонных конструкций // Строительство: наука и образование. 2022. Т. 12, № 1. С. 61-73.

7. Соловьева А. А. Метод оценки надежности элементов плоских ферм на основе р-блоков // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16, № 2. С. 153-167.

8. Сафронов В. С. Надежность стропильной фермы покрытия из тонкостенных профилей «Молодечно» // Строительная механика и конструкции. 2022. № 2 (33). С. 123-132.

9. Мехтиева С. С. Системный подход к оценке эффективности конструктивных решений стальных трапециевидных ферм покрытий // Инновации и инвестиции. 2022. № 9. С. 167-170.

10. Королев В. П. Эволюция концептуальных подходов к управлению коррозионной защищенностью стальных конструкций и сооружений // Промышленное и гражданское строительство. 2022. № 8. С. 32-40.

11. Райзер В. Д. Теория надежности сооружений. Москва: АСВ, 2010. 384 с.

12. Корольков Д. И., Шубина Ю. И. Разработка методики определения физического износа стальных колонн // Вестник евразийской науки. 2023. Т. 15, № 2. URL: <https://esj.today/PDF/63SAVN223.pdf>

13. Бузало Н. А. Снижение силового сопротивления стальных колонн производственных зданий, получивших коррозионные повреждения при эксплуатации // Строительство и архитектура. 2020. Т. 8, № 4. С. 9-13.

14. Кузнецов Д. Н. Оценка устойчивости несущих конструкций при численном моделировании // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. 2022. № 1 (20). С. 9-16.

15. Чайкин Е. А. Изучение напряженно-деформированного состояния узла структурной конструкции на клеенных стальных пластинах //

Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. Т. 24, № 4. С. 99-109.

16. Виноградова Ю. Л. Исследование надежности элементов инженерных сооружений путем генерации случайных величин // Вестник Вологодского государственного университета. 2023. № 2 (20). С. 12-14.

17. Паутова Т. А. Анализ методов вибродиагностики металлических конструкций // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2021. № 10 (739). С. 16-23.

18. Шорин В. А. Повышение надежности стальных резервуаров для хранения фосфорной кислоты // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2021. Т. 23, № 6. С. 157-164.

19. Ведяков И. И., Соловьев Д. В. Разработка методики оценки риска прогрессирующего обрушения // Вестник НИЦ «Строительство». 2021. № 28(1). С. 5-15.

20. Терехов И. А., Корожан А. И. Сравнение конструктивных решений железобетонных и металлических ферм с учетом эксплуатационных показателей // Тенденции развития науки и образования. 2022. № 92-15. С. 97-103.

21. Иньков А. Э. Оценка индекса надежности стальных ферм по критерию жесткости при интервальной неопределенности данных // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2023. Т. 19, № 1. С. 46-55.

22. Адамцевич Л. А., Кац В. А. Модель оценки надежности строительных систем на опасных производственных объектах в процессе их эксплуатации // Строительное производство. 2023. № 2. С. 102-105.

23. Масленников А. М., Кобелев Е. А., Масленников Н. А. Решение задач устойчивости методом конечных элементов // Вестник гражданских инженеров. 2020. № 2 (79). С. 68-74.

Статья поступила в редакцию 02.03.2024; одобрена после рецензирования 03.04.2024; принята к публикации 03.06.2024

Информация об авторах

АЛЕЙНИКОВА Маргарита Анатольевна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительной механики, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, г. Санкт-Петербург. Область научных интересов – техническое обследование зданий и сооружений, техническая эксплуатация зданий. Автор более 30 научных публикаций. E-mail: ale11971_80@mail.ru

СОЙТУ Наталья Юрьевна – кандидат технических наук, доцент кафедры строительной механики, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, г. Санкт-Петербург. Область научных интересов – техническое обследование зданий

и сооружений, техническая эксплуатация зданий. Автор более 30 научных публикаций.
E-mail: natali_s01@mail.ru

Вклад авторов: авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Scientific article

УДК 624.014+624.046+627.2+691.714

DOI: <https://doi.org/10.25686/2542-114X.2024.1.58>

EDN: LPXELJ

Reliability assessment of damaged steel structures

M. A. Aleinikova, N. Iu. Soitu[✉]

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (Saint Petersburg)

natali_s01@mail.ru[✉]

Abstract. Introduction. In industrial buildings and constructions, structural steel is widely used due to its exceptional seismic qualities, low self-weight, and high strength. Frame buildings and bridges, for example, frequently use continuous steel beams with two or more spans. Not only does their design ensure strength, but it also reduces weight and material expenses. However, due to environmental influences, steel structures are subject to corrosion. As a result of corrosion damage accumulation steel structures lose some of their bearing capacity and operational safety. Ensuring the durability and reliability of steel structures during their operation is the main challenge for the construction industry. Managing the operational life of buildings and other structures in actual surroundings, as well as selecting the best structural and technological innovations while strengthening the existing framework, are the main approaches to deal with this issue.

The aim of research is to consider the features of the reliability assessment in damaged steel structures.

Methods. The following methods were used in research: mathematical modelling, forecasting, systematisation, experimental research, generalisation.

Research results. It seems appropriate to consider the steel structure's background operation and use a combination of the Monte Carlo method (MC) and the finite element method (FEM) to assess the corrosion losses of the cross section of a steel beam. This will allow for the assessment of a steel structure's reliability based on its service life, the effects of an aggressive external environment, and the ageing of the metal itself. The loading history of accumulated fatigue is determined using left-sided truncated normal Gaussian distribution of a random resistance value. Atmospheric corrosion of metals is a complex process that depends on a large number of interacting environmental factors. In order to assess corrosion losses and the depth of corrosion, it is proposed to use a model that takes into account the influence of sulphur dioxide through its concentration and the rate of chloride deposition. The Monte Carlo method based on the use of pseudorandom sampling and the strong law of large numbers to assess the reliability of any system is chosen as a simulation. The article presents an algorithm for determining the probability of unreliability of steel structural systems by adapting the MC approach.

Conclusion. The methodology that combines the finite element method with the Monte Carlo method is proposed to evaluate the reliability of a continuous steel beam based on its service life and the atmospheric environment's corrosive effects.

Keywords: steel structure; reliability; corrosion; damage; node; Monte Carlo method; finite element method

Funding: this research received no external funding.

For citation: Aleynikova M. A., Soyту N. Iu. Reliability assessment of damaged steel structures. *Vestnik of Volga State University of Technology. Series: Materials. Constructions. Technologies.* 2024;(1):58–65. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.25686/2542-114X.2024.1.58>; EDN: LPXELJ

REFERENCES

1. Lin Youzhu. Theoretical models and reliability assessment of steel-UHPC-steel composite beams in offshore structures. *Ocean engineering*. 2023;78-84.
2. Lukin Ye. K., Sebeshev V. G. Reliability and durability of tubular elements of steel structures in case of corrosion damage. *Fundamental'nyye i prikladnyye voprosy transporta*. 2023;(2):78-84. (In Russ.).
3. Ngoc-Long T., Van-Phuc Ph., Morozov V. Investigation the corrosion initiation process in reinforced concrete structures under the impact of climate change. *Architecture and engineering*. 2021;6(2):37-44.
4. Nadolskiy V. V. Reliability coefficients for nonlinear models of the load-bearing capacity of beams with a flexible wall. *Vestnik MGSU*. 2023;(6):852-863. (In Russ.).
5. Mirsayapov I. T. Investigation of the stress-strain state of steel-reinforced concrete beams with partial sealing of I-sections in concrete. *News of the Kazan State University of architecture and engineering*. 2022;(3):56-66. (In Russ.).
6. Tusnin A. R. Numerical calculation of steel-reinforced concrete structures. *Construction: science and education*. 2022;12(1):61-73. (In Russ.).
7. Solovyeva A. A. A method for assessing the reliability of elements of flat trusses based on p-blocks. *Vestnik MGSU*. 2021;16(2):153-167. (In Russ.).
8. Safronov V. S. Reliability of a rafter truss covering from thin-walled profiles "Molodechno". *Structural mechanics and structures*. 2022;(2):123-132. (In Russ.).
9. Mekhtiyeva S. S. A systematic approach to evaluating the effectiveness of structural solutions of steel trapezoidal coating trusses. *Innovation and Investment*. 2022;(9):167-170. (In Russ.).
10. Korolev V. P. Evolution of conceptual approaches to the management of corrosion protection of steel structures and structures. *Industrial and Civil Engineering*. 2022;(8):32-40. (In Russ.).
11. Rayzer V. D. Theory of reliability of equipment. Moscow: ASV; 2010. 384 p. (In Russ.).
12. Korolkov D. I., Shubina Ju. I. Development of methods for determining the physical wear of steel columns. *The Eurasian Scientific Journal*. 2023;15(2). Available from: <https://esj.today/PDF/63SAVN223.pdf> (In Russ.).
13. Buzalo N. A. Reduction of the force resistance of steel columns of industrial buildings that have received corrosion damage during operation *Construction and Architecture*. 2020;8(4):9-13. (In Russ.).
14. Kuznetsov D. N. Assessment of the stability of non-existent structures in numerical modeling. *Housing and utilities infrastructure*. 2022;(1):9-16. (In Russ.).
15. Chaykin Ye. A. Studying the stress-strain state of a structural design node on glued steel plates. *Journal of Construction and Architecture*. 2022;24(4):99-109. (In Russ.).
16. Vinogradova Yu. L. Investigation of reliability of elements of engineering structures by generating random variables. *Bulletin of Vologda State University*. 2023;(2):12-14. (In Russ.).
17. Pautova T. A. Analysis of methods of vibration diagnostics of metal structures. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*. 2021;(10):16-23. (In Russ.).
18. Shorin V. A. Improving the reliability of steel tanks for phosphoric acid storage. *Journal of Construction and Architecture*. 2021;23(6):157-164. (In Russ.).
19. Vedyakov I. I., Solovyev D. V. Development of a methodology for assessing the risk of progressive disease. *Bulletin of the Scientific Research Center of Construction*. 2021;(28):5-15. (In Russ.).
20. Terekhov I. A., Korozhan A. I. Comparison of structural solutions of reinforced concrete and metal trusses taking into account operational indicators. *Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya*. 2022;(92-15):97-103. (In Russ.).
21. Inkov A. E. Evaluation of the reliability index of steel trusses according to the criterion of rigidity with an inter-val uncertainty of data. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2023;19(1):46-55. (In Russ.).
22. Adamtsevich L. A., Kats V. A. Model for assessing the reliability of construction systems at hazardous production facilities during their operation. *Construction production*. 2023;(2):102-105. (In Russ.).
23. Maslennikov A. M., Kobelev Ye. A., Maslennikov N. A. Solving problems of stability of the finite element method. *Bulletin of Civil Engineers*. 2020;(2):68-74. (In Russ.).

The manuscript was submitted on 02.03.2024; reviewed on 03.04.2024;
adopted for publication on 03.06.2024

Information about the authors

ALENIKOVA Margarita Anatolevna – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the Department of Construction Mechanics, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg. Research interests – technical inspection of buildings and structures, technical maintenance of buildings. Author of more than 30 publications. E-mail: ale11971_80@mail.ru

SOITU Natalia Iurevna – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the Department of Construction Mechanics, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg. Research interests – technical inspection of buildings and structures, technical maintenance of buildings. Author of more than 30 publications. E-mail: natali_s01@mail.ru

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this paper.

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest.

The authors reviewed the results and approved the final version of the manuscript.