

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

НАДЕЖНОСТЬ И ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ТРУБЧАТЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ НЕРАВНОМЕРНЫХ КОРРОЗИОННЫХ ПОВРЕЖДЕНИЯХ

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Розенфельд И.Л. Атмосферная коррозия металлов. М.: Изд-во АН СССР, 1980. 250 с.
2. Каблов Е.Н., Старцев О.В. Фундаментальные и прикладные исследования коррозии и старения материалов в климатических условиях (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 4(37). С. 38–52. doi:10.18577/2071-9140-2015-0-4-38-52.
3. Uhlig H.H., Revie R.W. Corrosion and Corrosion Control: An Introduction to Corrosion Science and Engineering. John Wiley & Sons, Inc., 1985. 441 p.
4. Козлов В.Г., Титова И.В., Коноплин А.Н., Булыгин Н.Н. Методы борьбы с коррозией металлов // Фундаментальные исследования. 2017. № 6. С. 53–57.
5. Виноградов С.С., Никифоров А.А., Демин С.А., Чесноков Д. В. Защита от коррозии углеродистых сталей // Авиационные материалы и технологии. 2017. № 8. С. 242–263. doi:10.18577/2071-9140-2017-0-S-242-263.
6. Черепашкин С.Е., Латыпов О.Р., Кравцов В.В. Методы исследования коррозии оборудования нефтегазового комплекса. Уфа: ООО "Изд-во науч.-техн. литературы "Монография", 2016. 104 с.
7. Голдобина Л. А. Анализ причин коррозионных разрушений подземных трубопроводов и новые решения повышения стойкости стали к коррозии // Записки Горного института. 2016. Т. 219. С. 459–464.
8. O'Grady P. T. J., Hissey D. T., Kiefner J. F. Pressure Calculation for Corroded Pipe Development // Oil & Gas Journal. 1992. Oct. 19. Pp. 84–89.
9. Ибрагимов А.А., Подорожников С.Ю., Шабаров А.Б. Расчетная модель и алгоритм определения остаточного ресурса трубопровода в условиях периодических изменений напряжений и коррозии // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2014. № 4. С. 199–206.
10. Антонов А.В., Острейковский В.А. Ресурс и срок службы оборудования энергоблоков атомных станций. М.: Инновационное машиностроение, 2017. 536 с.
11. Вольберг Ю.Л., Коряков А.С. Учет воздействия агрессивной среды на несущую способность стальных конструкций // Труды МИСИ, 1983. № 183. С. 30–31.
12. Гладштейн Л.И., Лактюшин В.С. Применение атмосферостойких сталей без защитных покрытий в строительных конструкциях. Госстрой СССР. Центральный институт научной информации по строительству и архитектуре, 1979. Вып. 6. 53 с.
13. Голубев А.И. Влияние коррозии металлов на долговечность металлических конструкций // Исследования надежности металлических конструкций: Труды ЦНИИПроектстальконструкция, 1979. С. 85–94.
14. Лашенко М.Н. Повышение надежности металлических конструкций зданий и сооружений при реконструкции. Ленинград: Стройиздат, 1987. 134 с.
15. Бондаренко В.М., Прохоров В.Н. К вопросу об оценке силового сопротивления железобетона повреждению коррозионными воздействиями // Изв. вузов. Строительство, 1998. № 3. С. 30–41.
16. Ржаницын А.Р. Теория расчёта строительных конструкций на надёжность. М.: Стройиздат, 1978. 239 с.
17. Raizer V. Reliability of Structures. Analysis and Applications. Backbone Publishing Company (USA). 2009. 146 p.
18. Ведяков И.И., Райзер В.Д. Надежность строительных конструкций. Теория и расчет: Научное издание. М.: Изд-во АСВ, 2018. 414 с.

19. Vrouwenvelder T. Treatment of risk and reliability in the Euro-codes. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Structures and Buildings. 2008. Volume 161, issue SB4 (August). Pp. 209–214.
20. Себешев В.Г. Расчеты надежности сооружений и конструкций по поликритериальным и обобщенным условиям безотказности // Известия Петербургского университета путей сообщения, 2017. Т. 14. № 1. С. 165–174.
21. Бирюлев В.В., Кошин И.И., Крылов И.И., Сильвестров А.В. Проектирование металлических конструкций. Спец. курс. Учеб. пособие для вузов. Ленинград: Стройиздат, 1990. 432 с.
22. Себешев В.Г. Надежность и долговечность растянутых элементов стержневых конструкций при коррозионных повреждениях // Изв. вузов. Строительство. 2006. № 11–12. С. 100–107.

REFERENCES

1. Rozenfeld I.L. Atmosfernaya korrozziya metallov [Atmospheric corrosion of metals]. Moscow: Izdatel'stvo AN SSSR [Publishing house of the USSR Academia of Sciences]. 1980. 250 p. (rus).
2. Kablov E.N., Startsev O.V. Fundamental'nyye i prikladnyye issledovaniya korrozii i stareniya materialov v klimaticheskikh usloviyakh (obzor) Фундаментальные и прикладные исследования коррозии и старения материалов в климатических условиях (обзор) [Fundamental and applied researches on corrosion and aging of materials under climatic conditions (review)]. Aviatsionnyye materialy i tekhnologii [Aviation materials and technologies]. 2015. No. 4(37). Pp. 38–52. doi:10.18577/2071-9140-2015-0-4-38-52. (rus).
3. Uhlig H.H., Revie R.W. Corrosion and Corrosion Control: An Introduction to Corrosion Science and Engineering. John Wiley & Sons, Inc., 1985. 441 p.
4. Kozlov V.G., Titova I.V., Konoplin A.N., Bulygin N.N. Metody bor'by s korrozией metallov [Methods of combating metals' corrosion]. Fundamental'nyye issledovaniya [Fundamental researches]. 2017. No. 6. Pp. 53–57. (rus).
5. Vinogradov S.S., Nikiforov A.A., Dyomin S.A., Chesnokov D.V. Zashchita ot korrozii uglerodistykh staley [Corrosion protection for carbon steels]. Aviatsionnyye materialy i tekhnologii [Aviation materials and technologies]. 2017. No. 8. Pp. 242–263. doi:10.18577/2071-9140-2017-0-S-242-263. (rus).
6. Cherepashkin S.E., Latypov O.R., Kravtsov V.V. Metody issledovaniya korrozii oborudovaniya neftegazovogo kompleksa [Methods for studying corrosion of equipment in oil and gas complex]. Ufa: OOO "Izdatel'stvo nauchno-tekhnicheskoy literatury "Monografiya" [Publishing house of scientific and technical literature "Monograph", Ltd.]. 2016. 104 с.
7. Goldobina L.A. Analiz prichin korroziyonnykh razrusheniy podzemnykh truboprovodov i novyye resheniya povysheniya stoykosti stali k korrozii [Analysis of the causes of corrosion damage in underground pipelines and new solutions to improve the resistance of steel to corrosion]. Zapiski Gornogo instituta [Notes of the Mining Institute]. 2016. Vol. 219. Pp. 459–464. (rus).
8. O'Grady II T.J., Hissey D.T., Kiefner J.F. Pressure Calculation for Corroded Pipe Development // Oil & Gas Journal. 1992. Oct. 19. Pp. 84–89.
9. Ibragimov A.A., Podorozhnikov S.Yu., Shabarov A.B. Raschetnaya model' i algoritm opredeleniya ostatochnogo resursa truboprovoda v usloviyakh periodicheskikh izmeneniy napryazheniy i korrozii [Calculation model and algorithm for determining the residual life of the pipeline under conditions of periodic changing stresses and corrosion]. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) [Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)]. 2014. No. 84. Pp. 199–206. (rus).
10. Antonov A.V., Ostreykovskiy V.A. Resurs i srok sluzhby oborudovaniya energoblokov atomnykh stantsiy [Resource and service life of the power units' equipment of nuclear power plants]. Moscow: Innovatsionnoye mashinostroeniye [Innovative engineering]. 2017. 536 p. (rus).
11. Vol'berg Yu.L., Korjakov A.S. Uchët vozdeystviya agressivnoy sredy na nesushchuyu sposobnost' stal'nykh konstruktsiy [Taking into consideration the impact of an aggressive environment on the bearing capacity of steel structures]. Trudy MISI [Proceedings of Moscow Institute of Civil Engineering]. 1983. No. 183. Pp. 30–31. (rus).
12. Gladshteyn L.I., Laktyushin V.S. Primeneniye atmosferostoykikh staley bez zashchitnykh pokrytiy v stroitel'nykh konstruktsiyah [The use of atmospheric-resistant steels without protective coatings in building structures]. Gosstroy SSSR. Tsentral'nyy institut nauchnoy informatsii po stroitel'stvu i arkhitekture [Gosstroy of the USSR. Central Institute of Scientific Information on Construction and Architecture]. 1979. Iss. 6. 53 p. (rus).
13. Golubev A.I. Vliyaniye korrozii metallov na dolgovechnost' metallicheskiykh konstruktsiy [Influence of metal corrosion on the durability of metal structures]. Issledovaniya nadëzhnosti metallicheskiykh konstruktsiy. Trudy CNIIProektstal'konstruktsiya [Reliability studies of metal structures: Proceedings of the Central Research Institute of Projectsteelconstruction]. 1979. Pp. 85–94. (rus).
14. Lashchenko M.N. Povysheniye nadëzhnosti metallicheskiykh konstruktsiy zdaniy i sooruzheniy pri rekonstruktsii [Increase the reliability of metal structures of buildings and structures during reconstruction]. Leningrad: Stroyizdat. 1987. 134 p. (rus).
15. Bondarenko V.M., Prokhorov V.N. K voprosu ob otsenke silovogo soprotivleniya zhelezobetona povrezhdeniyu korroziyonnyimi vozdeystviyami [On the issue of assessing the force resistance of reinforced concrete to damage by corrosion]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 1998. No. 3. Pp. 30–41. (rus).
16. Rzhantsyn A.R. Teoriya raschëta stroitel'nykh konstruktsiy na nadëzhnost' [The theory of building structures' reliability analysis]. Moscow: Stroyizdat. 1978. 239 p. (rus).

17. Raizer V. Reliability of Structures. Analysis and Applications. Backbone Publishing Company (USA). 2009. 146 p.
18. Vedyakov I.I., Raizer V.D. Nadëzhnost' stroitel'nykh konstruktsiy. Teoriya i raschët: Nauchnoye izdaniye [Reliability of constructional structures. Theory and analysis: Scientific publication]. Moscow: Izdatel'stvo ASV [Publishing office of the Association of Construction Higher Educational Institutions]. 2018. 414 p. (rus).
19. Vrouwenvelder T. Treatment of risk and reliability in the Euro-codes. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Structures and Buildings. 2008. Vol. 161, issue SB4 (August). Pp. 209–214.
20. Sebeshev V.G. Raschëty nadëzhnosti sooruzheniy i konstruktsiy po polikriterial'nym i obobshchënym usloviyam bezotkaznosti [Analysis of the reliability of buildings and structures according to polycriteria and generalized conditions of serviceability]. Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya [Proceedings of the Petersburg State Transport University]. 2017. Vol. 14. No. 1. Pp. 165–174. (rus).
21. Biryulyov V.V., Koshin I.I., Krylov I.I., Sil'vestrov A.V. Proektirovaniye metallicheskih konstruktsiy. Spetsial. kurs. Uchebn. posobiye dlya vuzov [Design of metal structures. Special course. Textbook for universities]. Leningrad: Stroyizdat. 1990. 432 p. (rus).
22. Sebeshev V.G. Nadëzhnost' i dolgovechnost' rastyanutykh elementov sterzhnevyykh konstruktsiy pri korrozionnykh povrezhdeniyakh [Reliability and durability of tensioned elements of bar structures in case of corrosion damage]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2006. No. 11–12. Pp. 100–107. (rus).

Информация об авторах:

Себешев Владимир Григорьевич

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

Лукин Егор Константинович

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

Information about authors:

Sebeshev Vladimir G.

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

Lukin Egor K.

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