

DOI: 10.24000/0409-2961-2023-8-20-25

УДК 620.193:621.039.568

© Н.А. Махутов, А.П. Черепанов, М.В. Лисанов, 2023

Численная идентификация показателей коррозии при оценке технического состояния оборудования



Н.А. Махутов,
чл.-корр. РАН, д-р
техн. наук, проф.,
гл. науч. сотрудник

ИМАШ РАН,
Москва, Российская
Федерация



А.П. Черепанов,
д-р техн. наук, проф.
кафедры,
boning89@mail.ru

АнгТУ, Ангарск,
Российская
Федерация



М.В. Лисанов,
д-р техн. наук,
директор центра
анализа риска

ЗАО НТЦ ПБ,
Москва, Российская
Федерация

Дан анализ методов идентификации коррозии и коррозионной стойкости металлов при определении коррозионного состояния технических устройств опасных производственных объектов. Обоснован метод численной идентификации коррозии как наиболее приемлемый для определения степени опасности коррозионных процессов при оценке технического состояния оборудования опасных производств.

Ключевые слова: численная идентификация, показатели коррозии, техническое состояние оборудования, виды коррозии, глубина коррозионных поражений, оценка опасности коррозии, коррозионная стойкость, жизненный цикл оборудования.

Для цитирования: Махутов Н.А., Черепанов А.П., Лисанов М.В. Численная идентификация показателей коррозии при оценке технического состояния оборудования // Безопасность труда в промышленности. 2023. № 8. С. 20–25. DOI: 10.24000/0409-2961-2023-8-20-25

Numerical Identification of Corrosion Indicators when Assessing the Equipment Technical Condition

N.A. Makhutov, RAS Corresponding Member, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Chief Research Associate, IMASH RAN, Moscow, Russian Federation
A.P. Cherepanov, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Department, boning89@mail.ru, Angarsk State Technical University, Angarsk, Russian Federation

M.V. Lisanov, Dr. Sci. (Eng.), the Director of Risk Analysis Center, STC «Industrial Safety» CJSC, Moscow, Russian Federation

Abstract. The method is presented in the article concerning numerical identification of corrosion and corrosion resistance of metals, which serves to determine the degree of hazard of the corrosive state of technical devices of hazardous production facilities. Currently, the causes of metal failure are determined by metallography, radiography, ultrasonic, color, magnetic particle inspection or sample testing. Risk of the development of corrosion processes, depending on the type of corrosion, the characteristics of its shape, the depth of corrosion damage and the area of the affected surfaces, is determined visually or by the instrumental detection methods. Numerical identification of the indicators of corrosion and corrosion resistance of metals, proposed in the work, is carried out taking into account the location of the corrosion process, the form of corrosion damage, the size, unevenness and depth of penetration of various types of corrosion, the degree of damage to the surface by uniform and local corrosion (spots, ulcers, pitting). At the same time, according to the initial size of surface and deep corrosion, the actual size of the corrosion wear of a structural element is determined, and according to the scheme of a typical type and characteristic of the form of corrosion damage, the type of corrosion is determined. Further, taking into account the corrosion hazard score in accordance with the scale of corrosion resistance, a numerical indicator of corrosion and corrosion resistance of the structural metal is determined.

Studies showed that the numerical identification of the indicators of corrosion and corrosion resistance of metals makes it possible to match the type of corrosion and the characteristics of the form of corrosion damage with the corrosion coefficient depending on the scheme of a typical type of corrosion damage. In addition, numerical identification shows the extent of damage to the surface by uniform and localized corrosion, including spots, pitting and other types of corrosion. Thus, it is applicable to determine the degree of corrosion hazard in assessing the technical condition and establishing the service life at any stage of the life cycle of equipment in hazardous industries.

Keywords: numerical identification, corrosion indicators, equipment technical condition, types of corrosion, depth of corrosion damage, assessment of corrosion hazard, corrosion resistance, equipment life cycle.

For citation: Makhutov N.A., Cherepanov A.P., Lisanov M.V. Numerical Identification of Corrosion Indicators when Assessing the Equipment Technical Condition. *Bezopasnost Truda v Promyshlennosti = Occupational Safety in Industry*. 2023. № 8. pp. 20–25. (In Russ.). DOI: 10.24000/0409-2961-2023-8-20-25

Введение

Одной из задач технического освидетельствования и диагностирования при эксплуатации технических устройств (ТУ) опасных производственных объектов [1] является определение их коррозионного состояния применительно к требованиям [2] по снижению риска аварий и разрушения оборудования [3].

Работа металла при различных средах, температурах, условиях движения жидкости, видах и величинах механических напряжений характеризуется показателями коррозии и коррозионной стойкости, которые учитывают количественные, полуколичественные (балльные) и качественные показатели [4]. Показатели стойкости материала к коррозии определяют в

лабораторных условиях [5, 6]. Известно, что потери прочности при равномерной коррозии составляют около 10 %, при неравномерной — около 50 %, а при межкристаллитной — более 80 %. Поэтому наиболее опасны локальные виды коррозии [6] — питтинги и язвы глубиной от 0,01 до 0,15 мм, которые появляются на рабочих колесах насосов, в теплообменной аппаратуре и других ТУ [7, 8]. Расчет толщин стенок сосудов и аппаратов проводят с использованием прибавки на коррозию [9], а скорость роста относительного объема коррозии в год определяют по среднему значению линейной скорости коррозии [10], которую при техническом диагностировании (ТД) обычно устанавливают в пределах 0,1–0,15 мм/год. Имеется в виду, что коррозионные дефекты приводят к сквозным разрушениям [11], увеличению напряжений [12] и коррозионному растрескиванию под напряжением [13]. Моделирование открытой коррозионной трещины показывает, что напряжения в вершине трещины в 6–7 раз превышают напряжения вне ее зоны [14]. Вероятность разрушения металла идентифицируют с помощью металлографии, рентгенографии, ультразвуковой, цветной и магнитно-порошковой дефектоскопии [15]. Однако данные методы не позволяют прогнозировать опасность развития коррозионных процессов [16]. Цифровая обработка изображений, идентифицирующих коррозию [17, 18], не используется при математической обработке результатов коррозионных исследований, в частности, для оценки технического состояния и прогнозирования ресурса ТУ [19]. Определение относительного объема коррозии [20] также далеко не всегда показывает степень ее опасности.

Исследование методов идентификации коррозии показывает, что различные характеристики коррозионных дефектов определяют преимущественно путем испытания образцов [4], что, естественно, не дает исчерпывающей информации о стойкости к коррозионному износу металла оборудования, находящегося в эксплуатации.

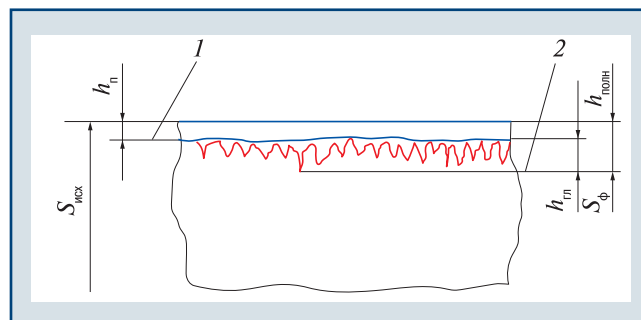
Цель работы — обоснование метода численной идентификации коррозии для определения степени опасности коррозионных процессов при оценке технического состояния оборудования опасных производств.

Обоснование численных

показателей коррозии металлов

Коррозионную стойкость принято характеризовать количественными показателями, выбор которых определяется видом коррозии и эксплуатационными требованиями [4]. Для количественной и качественной оценки коррозионной стойкости металлов установлена десятибалльная шкала коррозионной стойкости [21]. Идентификацию факторов коррозионного износа с учетом места протекания коррозионного процесса, неравномерности и глубины проникновения очагов коррозии и их размеров [22, 23] проводят методом экспертных оценок. Определять степень износа обо-

рудования из-за воздействия коррозии [24] предложено визуальным или приборным обнаружением при ТД оборудования с нахождением очагов коррозии, степени проникновения поверхностной и глубинной коррозии в материал. С учетом исходного размера оборудования, величины поверхностной, глубинной коррозии и фактической толщины стенки (рис. 1, здесь 1 — поверхностная коррозия; 2 — глубинная коррозия; $h_{\text{полн}}$ — полный коррозионный износ) определяют фактический размер элемента конструкции:



▲ Рис. 1. Схема коррозионного износа стенки

▲ Fig. 1. Scheme of corrosion wear of the wall

$$S_{\phi i} = S_{\text{исх}i} - h_{n i} - h_{г i} \quad (1)$$

где $S_{\phi i}$ — фактический размер i -го элемента оборудования; $S_{\text{исх}i}$ — исходный размер i -го элемента оборудования; $h_{n i}$ — величина поверхностной коррозии i -го элемента оборудования; $h_{г i}$ — величина глубинной коррозии i -го элемента оборудования.

Пользуясь схемой определения степени коррозионного износа (рис. 2), устанавливают полный коррозионный износ элемента:

$$\Delta S_i = S_{\text{исх}i} - S_{\phi i} \quad (2)$$

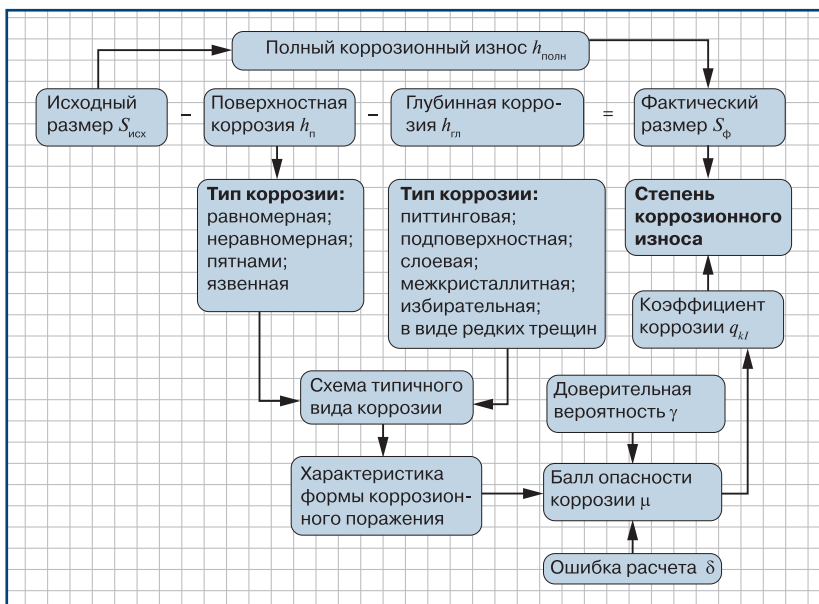
Для поверхностной и глубинной коррозии определяют ее тип [4], схему типичного вида и характеристику формы коррозионного поражения. А численную идентификацию проводят посредством коэффициента коррозии [24], который определяют с помощью статистического анализа и расчета в зависимости от балла опасности коррозии:

$$q_{k i} = \beta_i / \mu_i \quad (3)$$

где $q_{k i}$ — коэффициент коррозии i -го конструкционного материала оборудования; μ_i — балл опасности коррозии в соответствии со шкалой коррозионной стойкости i -го конструкционного материала оборудования; β_i — степень опасности коррозионного разрушения i -го конструкционного материала оборудования:

$$\beta_i = \gamma^{2\delta} \quad (4)$$

где γ — доверительная вероятность оценки опасности или квантиль нормального распределения, выбира-



▲ Рис. 2. Схема определения степени коррозионного износа
 ▲ Fig. 2. Scheme for determining the degree of corrosion wear

ется из ряда: 0,75–0,99; δ — максимально допустимая относительная ошибка расчета опасности, выбирается из ряда: 0,05–0,3.

Коэффициенты коррозии (3) для баллов опасности от 1 до 3 по десятибалльной шкале коррозионной стойкости [21] принимают от 0,979 до 0,853. При глубинной коррозии, которая наиболее опасна с точки зрения прочности материала, балл опасности коррозии по шкале [21] повышается от 4 до 10, а значения коэффициентов коррозии принимают от 0,788 до 0,356. С повышением балла опасности, в соответствии со схемой типичного вида коррозионного поражения [4], коэффициент коррозии снижается в зависимости от типа коррозии, характеристики формы коррозионного поражения [5] и степени износа оборудования под воздействием коррозии [24]. Степень коррозионного износа, например одной из стенок корпуса, изготовленного из одного конструкционного материала, определяется как:

$$n_{Si} = \frac{\Delta S_i^{1/q_{ki}}}{S_{\phi i}}, \quad (5)$$

где n_{Si} — степень коррозионного износа i -го элемента оборудования.

Максимальную степень коррозионного износа, например, нескольких стенок корпуса единицы оборудования, изготовленного из различных конструкционных материалов, определяют по наиболее изношенному элементу:

$$n_s = \max(n_{s1}, n_{s2}, \dots, n_{sm}), \quad (6)$$

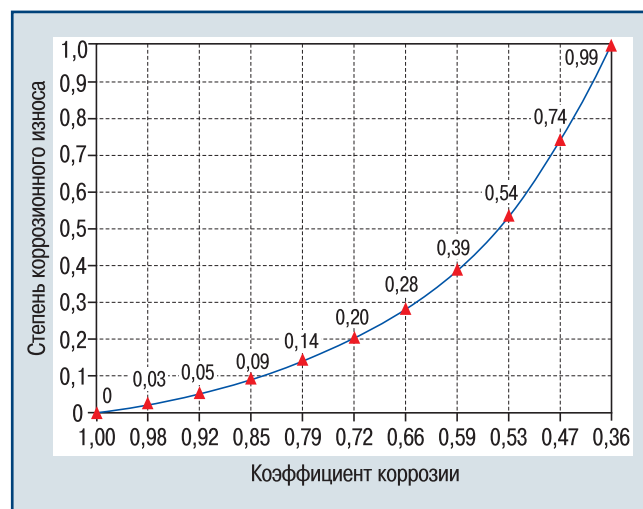
где n_s — степень коррозионного износа, например, нескольких элементов единицы оборудования, изготовленного из различных конструкционных мате-

риалов; n_{Sm} — степень износа каждого элемента оборудования при общем числе элементов m .

Обсуждение результатов численной идентификации показателей коррозии

В работе показано, что при утонении стенок вследствие коррозии степень коррозионного износа идентифицируется коэффициентом коррозии (3), который в работе [23] предложено представлять непрерывной величиной, наиболее удобной для аналитической обработки результатов ТД оборудования. В отличие от экспертных оценок [22], идентификация факторов коррозионного износа численными значениями коэффициентов коррозии (3) в зависимости от ее типа, характеристик форм коррозионных поражений и схем их типичного вида [4] учитывает характер распределения коррозионного

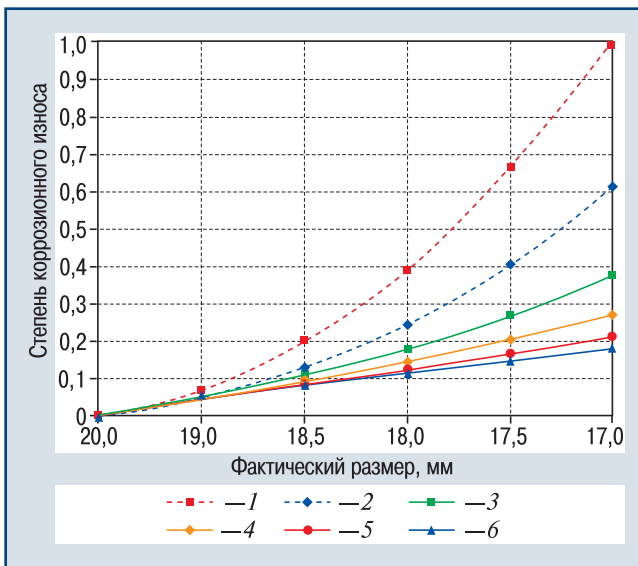
поражения, например, в виде скоплений или очагов на границе двух структур металла. На рис. 3 показана зависимость степени коррозионного износа (5) при снижении размера элемента от $S_{ii} = 20$ мм до $S_{\phi i} = 17,25$ мм при коэффициентах коррозии от 0,98 до 0,36.



▲ Рис. 3. Зависимость степени коррозионного износа от коэффициента коррозии при снижении размера элемента

▲ Fig. 3. The dependence of the degree of corrosion wear on the corrosion coefficient when the element size decreases

Из графика на рис. 4 (здесь 1–6 — зависимости коррозионного износа при коэффициенте коррозии: 1 — 0,36; 2 — 0,47; 3 — 0,59; 4 — 0,72; 5 — 0,85; 6 — 0,98) видно, что при снижении размера конструкционного элемента степень коррозионного износа возрастает тем больше, чем ниже коэффициент коррозии.



▲ Рис. 4. Зависимость степени коррозионного износа при снижении размера элемента при различных коэффициентах коррозии

▲ Fig. 4. Dependence of the degree of corrosion wear when reducing the size of the element at different corrosion coefficients

Таким образом, коэффициенты коррозии (3) с учетом опасности коррозионного разрушения конструкционного материала оборудования (4), коррозионного износа (5) каждого элемента и, например, нескольких стенок корпуса единицы оборудования, изготовленного из различных конструкционных материалов (6), дают возможность определять степень опасности коррозии при оценке технического состояния и определении срока службы оборудования опасных производств на любом отрезке жизненного цикла.

Хотя шкала оценки коррозионной стойкости металлов [21] и получила большое распространение, особенно в химической промышленности, она не является универсальной, так как для оборудования различного назначения допустимые скорости коррозии могут отличаться на порядок и более.

Заключение

Численная идентификация коррозии металла дает возможность согласовать тип коррозии и характеристику формы коррозионного поражения с коэффициентом коррозии в зависимости от схемы типичного вида коррозионного поражения или характеристику распределения коррозии — с десятибалльной шкалой коррозионной стойкости и схемой типичного распределения коррозии.

Данная идентификация в зависимости от форм коррозионных поражений показывает степень повреждения поверхности равномерной и локальной коррозией, включая пятна, изъязвления и другие виды коррозии.

Численная идентификация коррозии применима для определения степени опасности коррозии при оценке технического состояния и определении срока

службы оборудования опасных производств на любом отрезке жизненного цикла.

Применение численной идентификации коррозии дает возможность повышения точности оценки проектного, исходного, текущего и остаточного ресурса, как предложено в работах [3, 19, 23].

Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ 20-19-00769.

Список литературы

- Махутов Н.А., Черепанов А.П., Лисанов М.В. Задачи разработки и реализации системы управления промышленной безопасностью предприятия при эксплуатации технических устройств// Безопасность труда в промышленности. 2021. № 2. С. 15–19. DOI: 10.24000/0409-2961-2021-2-15-19
- Правила проведения экспертизы промышленной безопасности: федер. нормы и правила в обл. пром. безопасности. 6-е изд., испр. и доп. Сер. 26. Вып. 12. М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2023. 20 с.
- Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Управление ресурсом эксплуатации высокорисковых объектов/ под общ. ред. Н.А. Махутова. М.: МГОФ «Знание», 2015. 600 с.
- ГОСТ 9.908–85. Единая система защиты от коррозии и старения. Металлы и сплавы. Методы определения показателей коррозии и коррозионной стойкости. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200007383> (дата обращения: 04.07.2023).
- ГОСТ Р 51372–99. Методы ускоренных испытаний на долговечность и сохраняемость при воздействии агрессивных и других специальных сред для технических изделий, материалов и систем материалов. Общие положения. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200010714> (дата обращения: 04.07.2023).
- Каландаров Н.О., Гойибова Д.Ф. Влияние коррозии на прочность оборудования// Молодой ученый. 2016. № 9 (113). С. 171–173.
- Балезин С.А., Минкин В.В. Влияние потока и состава среды на скорость коррозии углеродистой стали в воде// Коррозия и защита в нефтегазовой промышленности РНТС. М.: ВНИИОЭНГ, 1976. № 2. С. 3–6.
- Кушин В.Н. Коррозионное разрушение и электрохимическая защита нефтепромысловых резервуаров// Коррозия и защита в нефтегазовой промышленности РНТС. М.: ВНИИОЭНГ, 1976. № 3. С. 50–51.
- ГОСТ 34233.1–2017. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Общие требования. URL: <https://docs.cntd.ru/document/556344844> (дата обращения: 04.07.2023).
- Методика диагностирования технического состояния и определения остаточного ресурса технологического оборудования нефтеперерабатывающих, нефтехимических производств (ДиОП-05). URL: http://gostrf.com/norma_data/48/48689/index.htm (дата обращения: 04.07.2023).
- Ткаченко В.Н., Нефедова З.И., Кириленко Б.А. Исследование протекторной защиты внутренней поверхности днища нефтепромысловых резервуаров// Коррозия и за-

щита в нефтегазовой промышленности РНТС. М.: ВНИИ-ОЭНГ, 1975. № 11. С. 19–22.

12. Исследование влияния коррозионных дефектов на прочность трубопроводов/ В.А. Ворков, Е.О. Капралова, М.А. Федотенко, А.В. Агафонов// Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. Т. 14. № 1 (2). С. 529–533.

13. Фокин М.Ф. Оценка прочности труб магистральных трубопроводов с дефектами стенки, ориентированными по окружности трубы, по критерию возникновения течи перед разрушением// Прикладная механика и технологии машиностроения: сб. науч. тр. Нижний Новгород: Интелсервис, 2005. С. 69–76.

14. Вансович К.А., Беселия Д.С., Нахлесткин А.А. Оценка влияния усталостных дефектов коррозионного происхождения на прочность магистральных трубопроводов с позиции механики разрушения. URL: <https://magazine.neftgaz.ru/articles/tsifrovizatsiya/507932-otsenka-vliyaniya-ustalostnykh-defektov-korroziionnogo-proiskhozhdeniya-na-prochnost-magistralnykh-tr/> (дата обращения: 04.07.2023).

15. Recognition and classification of metal fracture surface models based on wavelet transform/ Y.H. Yan, J.H. Gao, Y. Liu, S.C. Lei// Acta Metallurgica Sinica. 2002. Vol. 38. Iss. 3. P. 309–314.

16. Резник Я. Идентификация видов коррозии металлов. URL: https://aqua-therm.ru/articles/articles_196.html (дата обращения: 04.07.2023).

17. Еникеев М.Р., Малеева М.А., Губайдуллин И.М. Исследование механизма развития коррозионных поражений с использованием компьютерного зрения// Журнал Средневожского математического общества. 2013. Т. 15. № 3. С. 70–75.

18. Szunerits S., Walt D.R. Aluminum surface corrosion and the mechanism of inhibitors using pH and metal ion selective imaging fiber bundles// Analytical Chemistry. 2002. Vol. 74. Iss. 4. P. 886–894.

19. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Научные основы промышленной безопасности/ науч. руководитель Н.А. Махутов. М.: МГОФ «Знание», 2019. 824 с.

20. Усманов Р.Р., Чучкалов М.В., Аскарлов Р.М. Концепция безаварийной эксплуатации и капитального ремонта магистральных газопроводов ОАО «Газпром»// Газовая промышленность. 2015. № 1. С. 28–31.

21. ГОСТ 13819–68. Единая система защиты от коррозии и старения (ЕСЗКС). Металлы и сплавы. Десятибалльная шкала коррозионной стойкости. URL: <http://www.normacs.ru/Doclist/doc/3FQO.html> (дата обращения: 04.07.2023).

22. Cherepanov A.P., Lyapustin P.K. Forecasting Resources as a Method of Increasing the Security of Technical Devices// IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017. Vol. 253 (1). DOI: 10.1088/1757-899X/253/1/012004

23. Черепанов А.П. Прогнозирование ресурса технических устройств нефтехимических производств. Ангарск: ФБГОУ ВО «Ангарский государственный технический университет», 2020. 224 с.

24. Пат. 2796240 Рос. Федерация. Способ определения степени износа оборудования под воздействием коррозии/ А.П. Черепанов; опубл. 18.05.2023, Бюл. № 14.

References

1. Makhutov N.A., Cherepanov A.P., Lisanov M.V. Tasks of the Development and Implementation of Enterprise Industrial Safety Management System when Operating Technical Devices. *Bezopasnost truda v promyshlennosti = Occupational Safety in Industry*. 2021. № 2. pp. 15–19. (In Russ.). DOI: 10.24000/0409-2961-2021-2-15-19

2. Rules for conducting industrial safety expertise: Federal norms and regulations in the field of industrial safety. 6-e izd., ispr. i dop. Ser. 26. Iss. 12. Moscow: ZAO NTTs PB, 2023. 20 p. (In Russ.).

3. Makhutov N.A. Safety and security of Russia. Legal, socio-economic, scientific and technical aspects. Resource management of operation of the high-risk facilities. Moscow: MГОФ «Знание», 2015. 600 p. (In Russ.).

4. GOST 9.908–85. Unified system of corrosion and ageing protection. Metals and alloys. Methods for determination of corrosion and corrosion resistance indices. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200007383> (accessed: July 04, 2023). (In Russ.).

5. GOST R 51372–99. Accelerated life and storable life test methods in special aggressive and other special media for technical products, materials and systems of materials. General. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200010714> (accessed: July 04, 2023). (In Russ.).

6. Kalandarov N.O., Goyibova D.F. Influence of corrosion on the equipment strength. *Molodoy uchenyy = Young scientist*. 2016. № 9 (113). pp. 171–173. (In Russ.).

7. Balezin S.A., Minkin V.V. Influence of the flow and composition of the medium on the corrosion rate of carbon steel in water. *Korroziya i zashchita v neftegazovoy promyshlennosti RNTS = Corrosion and protection in the oil and gas industry of RNTS*. Moscow: VNIIOENG. 1976. № 2. pp. 3–6. (In Russ.).

8. Kushnir V.N. Corrosion destruction and electrochemical protection of the oilfield tanks. *Korroziya i zashchita v neftegazovoy promyshlennosti RNTS = Corrosion and protection in the oil and gas industry of RNTS*. M.: VNIIOENG, 1976. № 3. pp. 50–51. (In Russ.).

9. GOST 34233.1–2017. Vessels and apparatus. Norms and methods of strength calculation. General requirements. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/556344844> (accessed: July 04, 2023). (In Russ.).

10. Method for diagnosing the technical condition and determining the residual resource of technological equipment of the oil refining, petrochemical industries. (DiOR-05). Available at: http://gostrf.com/norma_data/48/48689/index.htm (accessed: July 04, 2023). (In Russ.).

11. Tkachenko V.N., Nefedova Z.I., Kirilenko B.A. Investigation of the tread protection of the inner surface of the oilfield tanks bottom. *Korroziya i zashchita v neftegazovoy promyshlennosti RNTS = Corrosion and protection in the oil and gas industry of RNTS*. M.: VNIIOENG, 1975. № 11. pp. 19–22. (In Russ.).

12. Vorkov V.A., Kapralova E.O., Fedotenko M.A., Aгафонов A.V. Research the influence of corrosion defects on durability of pipelines. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk = Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2012. Vol. 14. № 1 (2). pp. 529–533. (In Russ.).

13. Fokin M.F. Evaluation of the pipes strength of the main pipelines with wall defects oriented along the circumference of the pipe according to the criterion for the occurrence of a leak before destruction. *Prikladnaya mekhanika i tekhnologii mashinostroeniya: sb. nauch. tr.* (Applied Mechanics and Engineering Technologies: collection of the scientific articles). Nizhniy Novgorod: Intelservis, 2005. pp. 69–76. (In Russ.).
14. Vansovich K.A., Beseliya D.S. Nakhlestkin A.A. Evaluation of the influence of fatigue defects of corrosion origin on the main pipelines strength from the standpoint of fracture mechanics. Available at: <https://magazine.neftegaz.ru/articles/tsifrovizatsiya/507932-otsenka-vliyaniya-ustalostnykh-defektov-korroziionnogo-proiskhozhdeniya-na-prochnost-magistralnykh-tr/> (accessed: July 04, 2023). (In Russ.).
15. Yan Y.H., Gao J.H., Liu Y., Lei S.C. Recognition and classification of metal fracture surface models based on wavelet transform. *Acta Metallurgica Sinica*. 2002: Vol. 38. Iss. 3. pp. 309–314.
16. Reznik Ya. Identification of types of metals corrosion. Available at: https://aqua-therm.ru/articles/articles_196.html (accessed: July 04, 2023). (In Russ.).
17. Enikeev M.R., Maleeva M.A., Gubaydullin I.M. Study of the mechanism of corrosion damage development using computer vision. *Zhurnal Srednevolzhskogo matematicheskogo obshchestva = Middle Volga Mathematical Society Journal*. 2013. Vol. 15. № 3. pp. 70–75. (In Russ.).
18. Szunerits S., Walt D.R. Aluminum surface corrosion and the mechanism of inhibitors using pH and metal ion selective imaging fiber bundles. *Analytical Chemistry*. 2002. Vol. 74. Iss. 4. pp. 886–894.
19. Makhutov N.A. Safety and security of Russia. Legal, socio-economic, scientific and technical aspects. Scientific basis of industrial safety. Moscow: MGOF «Znanie», 2019. 824 p. (In Russ.).
20. Usmanov P.P., Chuchkalov M.V., Askarov P.M. The concept of accident-free operation and overhaul of the main gas pipelines of OAO Gazprom. *Gazovaya promyshlennost = Gas Industry*. 2015. № 1. pp. 28–31. (In Russ.).
21. GOST 13819–68. Unified Corrosion and Aging Protection System. Metals and alloys. Ten-point scale of corrosion resistance. Available at: <http://www.normacs.ru/Doclist/doc/3FQO.html> (accessed: July 04, 2023). (In Russ.).
22. Cherepanov A.P., Lyapustin P.K. Forecasting Resource as a Method of Increasing the Security of Technical Devices. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017. Vol. 253 (1). DOI:10.1088/1757-899X/253/1/012004
23. Cherepanov A.P. Forecasting the resource of technical devices of the petrochemical industries. Angarsk: FBGOU VO «Angarskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet», 2020. 224 p.
24. Cherepanov A.P. Method for determining the degree of wear of the equipment under the influence of corrosion. Patent № 2796240 R.F. Published: May 18, 2023. Bulletin № 14.

E-mail: boning89@mail.ru

Материал поступил в редакцию/Received 07.07.2023

После рецензирования/Revised 22.07.2023

Принят к публикации/Accepted 31.07.2023