

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

COMPUTER SIMULATION AND DESIGN AUTOMATION

УДК 620.19

DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-12-1065-1072

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА АВТОМАТИЗАЦИИ МОНИТОРИНГА ИЗНОСА ГАЗОПРОВОДА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ ВИБРАЦИИ

Р. В. Корнеев*, М. А. Скотникова, А. А. Альхименко

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

** krvthecreator@gmail.com*

Аннотация. Рассмотрены особенности мониторинга износа поверхности трубопровода и рулевой тяги оборудования. Предложен простой в применении алгоритм автоматического обнаружения повреждений магистрального трубопровода на основе вибрационных данных. Применение метода модального анализа, процедуры очистки данных, алгоритма обнаружения повреждений, основанного на методе квадрата расстояния Махаланобиса, построения логистических кривых (регрессии) ROC позволило автоматизировать процесс мониторинга рулевой тяги. Показано, что с увеличением площади повреждения и возрастанием коэффициента модального затухания от $5/8L$ до $8/10L$ доля истинно положительных результатов составляет 100 %, а предсказательная способность модели возрастает с использованием скользящего среднего значения модального затухания.

Ключевые слова: моделирование, автоматизация, мониторинг износа, газопровод, метод модального анализа

Благодарность: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00178, <https://rscf.ru/project/22-19-00178/>.

Ссылка для цитирования: Корнеев Р. В., Скотникова М. А., Альхименко А. А. Совершенствование метода автоматизации мониторинга износа газопровода с использованием данных вибрации // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 12. С. 1065–1072. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-12-1065-1072.

IMPROVEMENT OF THE METHOD OF AUTOMATION OF MONITORING OF GAS PIPELINE WEAR USING VIBRATION DATA

R. V. Korneev*, M. A. Skotnikova, A. A. Alkhimenko

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

** krvthecreator@gmail.com*

Abstract. The features of monitoring the wear of gas pipeline surface and the steering rod of the equipment are considered. An easy-to-use algorithm for automatic detection of damage to the main pipeline based on vibration data is proposed. The use of the modal analysis method, data cleaning procedure, damage detection algorithm based on the Mahalanobis distance squared method, and construction of logistic curves allow for automation of the process of steering rod monitoring. It is shown that with an increase in the damage area and an increase in the modal attenuation coefficient from $5/8L$ to $8/10L$, the proportion of true positive results is 100%, and the predictive ability of the model increases with the use of a moving average of the modal attenuation.

Keywords: modeling, automation, wear monitoring, gas pipeline, modal analysis method

Acknowledgments: The study was supported by the Russian Science Foundation Grant No. 22-19-00178, <https://rscf.ru/project/22-19-00178/>.

For citation: Korneev R. V., Skotnikova M. A., Alkhimenko A. A. Improvement of the method of automation of monitoring of gas pipeline wear using vibration data. *Journal of Instrument Engineering*. 2024. Vol. 67, N 12. P. 1065–1072 (in Russian). DOI:10.17586/0021-3454-2024-67-12-1065-1072.

Введение. Магистральный газопровод предназначен для транспортировки газа из района добычи в районы его потребления, движение газа по нему обеспечивается компрессорными станциями, размещаемыми через определенные расстояния (рис. 1).



Рис. 1

Для управления потоками транспортируемого газа используется трубопроводная арматура. В качестве газоперекачивающего агрегата применяется поршневый газомотокомпрессор, в котором объединены силовая часть (привод) и компрессор для сжатия газа.

Как показывает статистика, протяженность линейной части магистральных трубопроводов в Российской Федерации составляет более 242 тыс. км, из которых газопроводы — 166 тыс. км. Основная часть газопроводных труб проходит под землей, поэтому на их стенки воздействуют коррозионно-активные грунтовые воды [1–4]. Возникающий значительный коррозионно-механический износ (разрушение) металла поверхности труб составляет 63 %, а уменьшение толщины стенок труб, в свою очередь, может привести к возникновению аварийных ситуаций на магистральных газопроводах [5, 6]. К основным причинам сбоев в работе деталей оборудования относятся четыре механизма износа: коррозия, усталость, адгезия и абразивное изнашивание. Поэтому для обнаружения в газопроводе скрытых под землей повреждений разрабатываются автоматизированные технологии мониторинга износа труб в режиме реального времени с применением неразрушающих методов контроля [7–12].

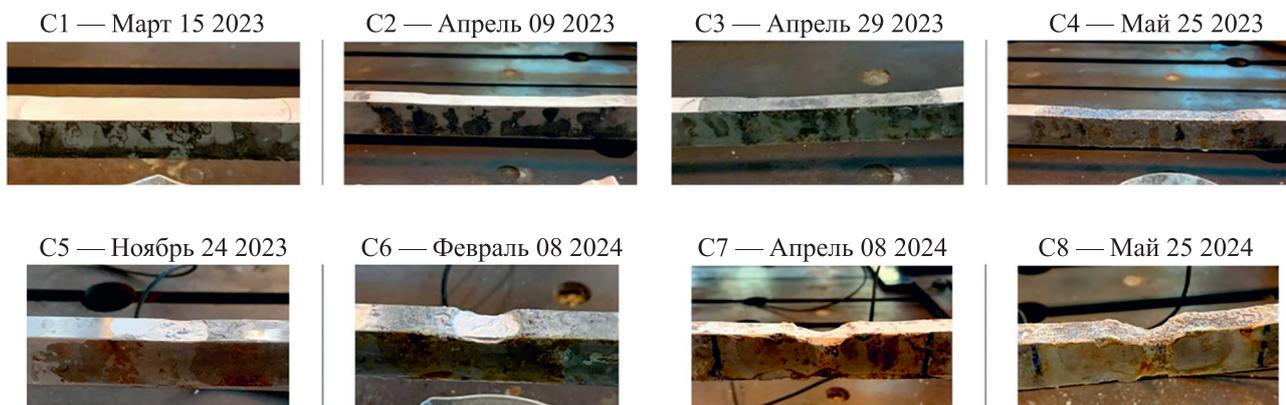


Рис. 2

Целью настоящей работы явилось совершенствование метода автоматизации обнаружения повреждений работающих рулевых тяг на магистральных газопроводах (на рис. 2 представлено увеличение повреждения работающей рулевой тяги во времени).

Материалы и методы исследования. В работе применялся алгоритм обнаружения повреждений, основанный на методе оценки квадрата расстояния Махаланобиса (MSD) [13]. С помощью расстояния Махаланобиса можно автоматически выявлять сходство неизвестной и известной выборки, т. е. какое наблюдение ближе к центру кластера (а значит, оно более достоверно) — для этого следует измерить расстояние от периферийных точек кластера до центра. Как показали результаты экспериментальных наблюдений, использование этого метода позволяет успешно выявлять реальные повреждения работающих рулевых тяг на магистральных газопроводах при их эксплуатации.

В работе применяются модальные испытания и модальный анализ для определения собственных частот, коэффициентов демпфирования и модальных форм (мод) собственных колебаний любой конструкции. Суть метода модального анализа состоит в том, что сигналы вибрационного возбуждения и измеренные сигналы отклика сложной конструкции, трудные для непосредственного восприятия, преобразуются в набор легко прогнозируемых модальных параметров.

С помощью одного датчика (акселерометра) на контролируемой рулевой тяге, без информации о действии на нее осевой нагрузки, автоматически (без временных проверок и присмотра человека-оператора) обнаруживались повреждения магистрального трубопровода.

На основе данных колебаний строились логистические регрессии, т. е. ROC-кривые (Receiver Operator Characteristic) — зависимости долей истинно положительных (TP) и ложноположительных (FP) случаев, по которым оценивали вероятность того, что интересующее событие произойдет (положительный исход события) или не произойдет (отрицательный исход события).

Расчетное значение уравнения регрессии y может быть от нуля (отрицательный исход события) до единицы (положительный исход события). Вероятность P того, что интересующее событие произойдет, и величина y , связываются зависимостью (ROC-кривой). Если предсказательная способность модели высока, график ROC-кривой проходит через верхний левый угол, где доля истинно положительных случаев составляет 100 % (или 1,0), а ложноположительных — равна нулю. Чем меньше изгиб кривой и чем ближе она расположена к диагонали (неразличимость двух классов), тем модель менее эффективна.

Стратегия обнаружения повреждений. Если рассматривается количество режимов колебания (M), то собственные частоты f_m ($m = 1, 2, \dots, M$) можно сохранить в виде вектора признаков \mathbf{v} :

$$\mathbf{v} = \{f_1, f_2, \dots, f_M\}^T, \quad (1)$$

где T — знак транспонирования; $m = 1$ указывает на первую рассматриваемую собственную частоту, необязательно связанную с первой модой колебания. При непрерывном мониторинге идентификация собственных частот может повторяться несколько раз N_{rec} , а собственные частоты могут храниться в матрице размером $N_{\text{rec}} \times M$ следующим образом:

$$\mathbf{B} = \begin{Bmatrix} \mathbf{v}_1^T \\ \mathbf{v}_2^T \\ \vdots \\ \mathbf{v}_{N_{\text{rec}}}^T \end{Bmatrix}, \quad (2)$$

где $r = 1, 2, \dots, N_{\text{rec}}$.

Индекс повреждения. Новое наблюдение вектора признаков \mathbf{v} в течение периода мониторинга, когда состояние работоспособности рулевой тяги неизвестно, называется \mathbf{v}_{new} , и можно использовать многомерные метрики, чтобы проверить, является ли \mathbf{v}_{new} выбросом по

отношению к наиболее вероятному \mathbf{B}_{ref} (вектору-столбцу размера $M \times 1$). Индекс повреждения I_d можно определить путем расчета методом MSD:

$$I_d = \text{MSD}(\mathbf{v}_{\text{new}}, \mathbf{B}_{\text{ref}}) = (\mathbf{v}_{\text{new}} - \mu_{\mathbf{B}}^{\text{ref}}) \Gamma (\mathbf{v}_{\text{new}} - \mu_{\mathbf{B}}^{\text{ref}}), \quad (3)$$

где $\Sigma_{\mathbf{B}_{\text{ref}}}$ — ковариационная матрица, связанная с \mathbf{B}_{ref} , $\mu_{\mathbf{B}}^{\text{ref}}$ — достоверное наблюдение вблизи центра кластера экспериментальных наблюдений MSD, а \mathbf{v}_{new} — новое, менее достоверное, наблюдение вдали от центра кластера.

В настоящей работе использован подход, основанный на вероятностном методе Монте-Карло, в соответствии с описанной процедурой, в которой используется элемент случайности (вероятности) t^* :

$$t = \frac{(N_{\text{rec}} - 1)(N_{\text{rec}} + 1)^2 t^*}{N_{\text{rec}}(N_{\text{rec}}^2 - (N_{\text{rec}} + 1)t^*)}. \quad (4)$$

Пороговое значение зависит как от количества наблюдений (N_{rec}), так и от количества переменных (M) решаемой задачи. Если $I_d > t$, то новое наблюдение \mathbf{v}_{new} считается маловероятным по отношению к \mathbf{B}_{ref} , и обнаруживается повреждение.

Автоматическая идентификация и очистка данных. Когда окружающая среда обеспечивает случайное возбуждение рулевой тяги, каждая собственная частота может быть идентифицирована посредством наилучшего соответствия между экспериментальным спектром мощности ответа G_{yy} , $\exp(\omega)$, функцией угловой частоты ω ($\omega = 2\pi f$, где f — частота, выраженная в Гц) и спектром мощности отклика механической SDOF-системы (single-degree-of-freedom) с собственной частотой f_m , возбуждаемой белым шумом:

$$G_{yy,\text{id}}(\omega, f_m, \xi_m, X_m, A_m) = \left| \frac{X_m}{-\omega^2 + j2\xi_m(2\pi f_m)\omega + (2\pi f_m)^2} + A_m \right|^2, \quad (5)$$

где j — мнимая единица, ξ_m — m -й коэффициент модального затухания (величина, определяющая степень рассеивания вибрационной волны), $X_m = \text{const}$ — функция уровня белого шума, компонента собственного вектора в точке измерения и модального коэффициента, а A_m — вклад внеполосных режимов или внешних факторов. Для компактности эти параметры сгруппированы в вектор $\boldsymbol{\theta}_m = \{f_m, \xi_m, X_m, A_m\}$ такой, что $G_{yy,\text{id}}(\omega, \boldsymbol{\theta}_m)$.

Преимущество этого простого метода заключается в том, что можно использовать один датчик (акселерометр), если он расположен не близко к узлу вибрации.

На рис. 3 представлены основные этапы испытания: выбор базовой линии отсчета; проверка на соответствие установленным требованиям (валидация); испытание в коррозионной среде рулевой тяги с коэффициентом модального затухания $\xi = 5/8L$ (а) и $9/10L$ (б).

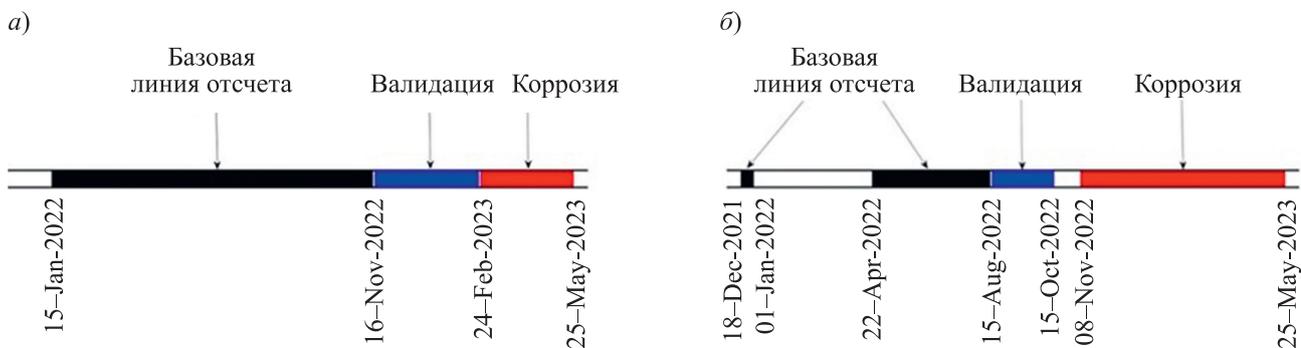


Рис. 3

Информация о модальном затухании получена из разных источников, содержала ошибки, пустые значения, дубли и др., была разнородной, что осложняло анализ. Кроме того, проводились исследования с данными скользящего среднего значения модального затухания (рис. 7).

Метод очистки данных позволил избавиться от большинства ошибок с помощью специальных инструментов и алгоритмов, обеспечил большую точность анализа. На рис. 5 представлен индекс повреждения до (а) и после (б) очистки данных.

Модальные испытания и модальный анализ являются незаменимыми инструментами при определении собственных частот, коэффициентов затухания (демпфирования) и форм (мод) собственных колебаний, это важное средство изучения колебательных характеристик механических конструкций.

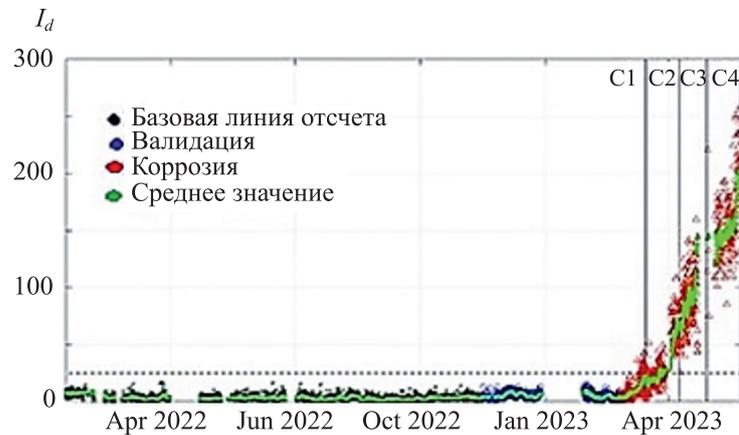


Рис. 4

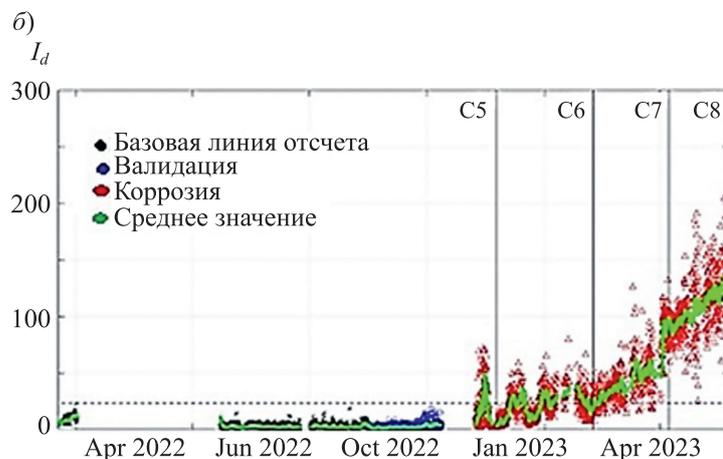
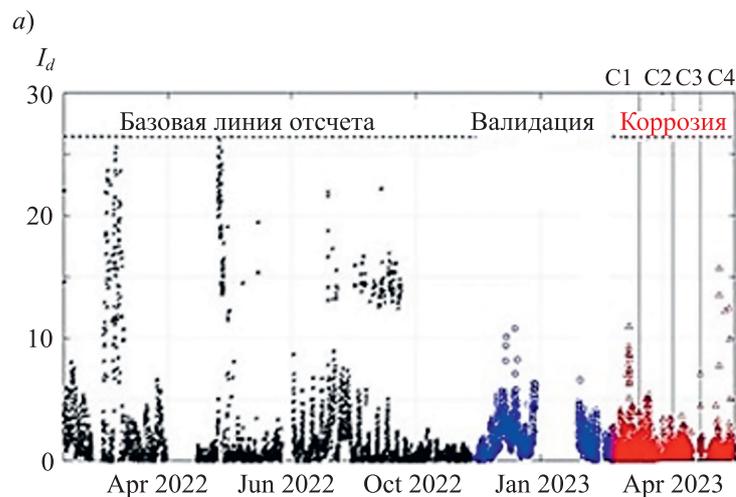


Рис. 5

С помощью метода модального анализа сигналы вибрационного возбуждения и сигналы отклика сложной конструкции, трудные для непосредственного восприятия, преобразуются в набор легко прогнозируемых модальных параметров [14, 15].

С помощью логистических регрессий (ROC-кривых) была оценена вероятность положительного исхода интересующего события (рис. 6, TP — истинно положительный, FP — ложноположительный). Испытания рулевой тяги в коррозионной среде проводились по мере увеличения повреждений, с увеличением коэффициента модального затухания от $\xi = 5/8L$ (рис. 6, а, б) до $8/10L$ (рис. 6, в, г), с использованием значений модального затухания, которые были получены из множества разных источников (см. рис. 6, а, в), а также с использованием скользящего среднего значения модального затухания (см. рис. 6, б, г).

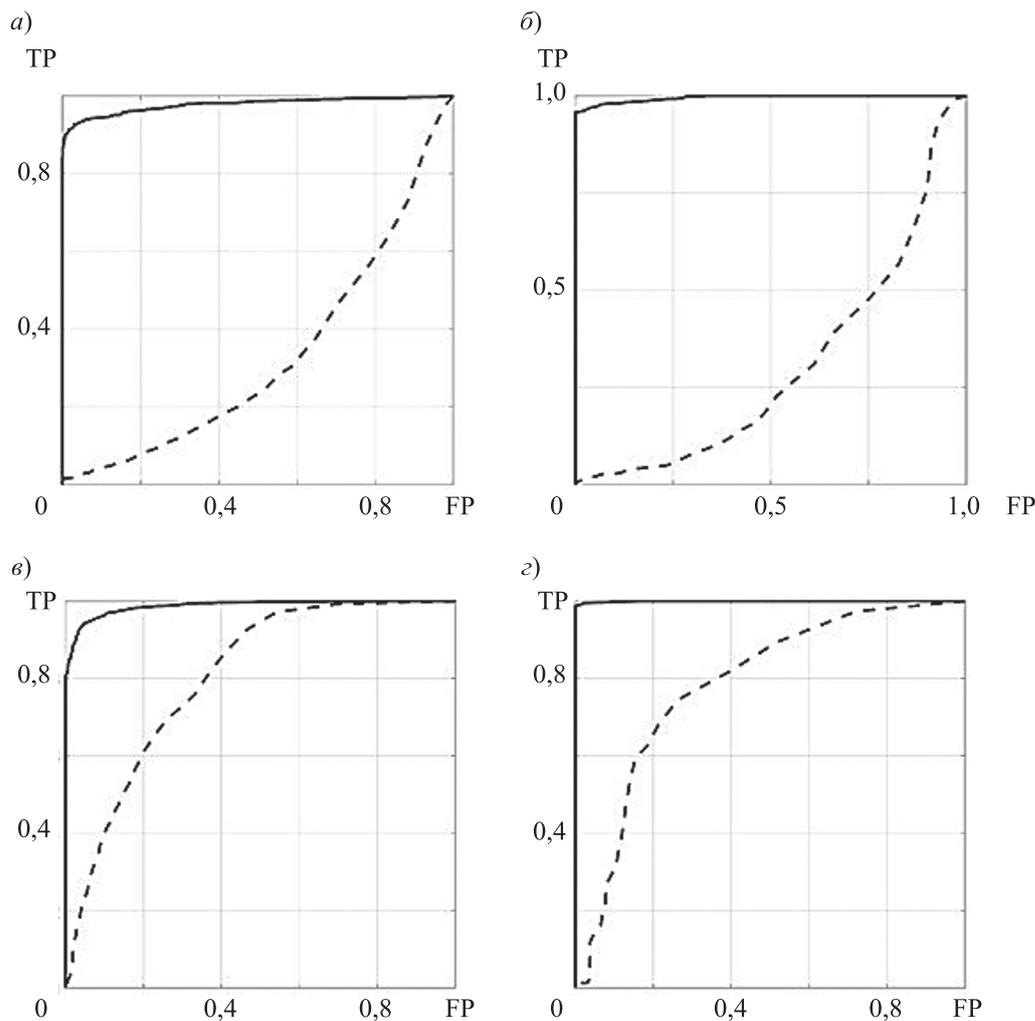


Рис. 6

Показано, что с увеличением повреждения и возрастанием коэффициента модального затухания от $\xi = 5/8L$ до $8/10L$ графики ROC-кривой проходят через верхний левый угол, где доля истинно положительных результатов составляет 100 %, а предсказательная способность модели возрастает, особенно когда результаты представлены с использованием данных скользящего среднего (рис. 5, б, а также рис. 6, б и г).

Заключение. Применение процедуры очистки данных, алгоритма обнаружения повреждений на основе квадрата расстояния Махаланобиса, построения логистических кривых (регрессии) позволило автоматизировать процесс мониторинга рулевой тяги. Таким образом, представленный метод позволяет успешно выявлять неконтролируемые эксплуатационные и экологические повреждения рулевых тяг, работающих на магистральных газопроводах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Медведева М. Л.* Основы электрохимической коррозии и защиты оборудования при транспорте и хранении нефти и газа. М.: Металлургия, 2004. 102 с.
2. *Герасимов В. В.* Прогнозирование коррозии металлов. М.: Металлургия, 1989. 151 с.
3. *Мустафин Ф. М.* и др. Защита трубопровода от коррозии: учеб. пос. для вузов. Т. 1. СПб: Недра, 2005. 617 с.
4. *Воробьева Г. Я.* Коррозионная стойкость материалов в коррозионных средах химических производств. М.: Химия, 1975. 300 с.
5. *Шумайлов А. С., Гуменов А. Г., Молдованов О. И.* Диагностика магистральных трубопроводов. М.: Недра, 1992. 251 с.
6. Анализ аварий и несчастных случаев на трубопроводном транспорте России: учеб. пос. для вузов / Под ред. *Б. Е. Прусенко, В. Ф. Мартынюка.* М.: Технонефтегаз, 2003. 351 с.
7. *Lucà F., Manzoni S., Cigada A., Barella S., Gruttadauria A., and Cerutti F.* Automatic Detection of Real Damage in Operating Tie-Rods // Sensors. 2022. Vol. 22, N 4. P. 1370.
8. *Awadallah O., Sadhu A.* Automated multiclass structural damage detection and quantification using augmented reality // Journal of Infrastructure Intelligence and Resilience. 2023. Vol. 2, N 1. P. 100024.
9. *El Mountassir M., Mourot G., Yaacoubi S., Maquin D.* Damage Detection and Localization in Pipeline Using Sparse Estimation of Ultrasonic Guided Waves Signals // IFAC-PapersOnLine. 2018. Vol. 51, N 24. P. 941–948.
10. *Eybpoosh M., Bergés M., & Noh H. Y.* Sparse representation of ultrasonic guided waves for robust damage detection in pipelines under varying environmental and operational conditions // Structural Control and Health Monitoring. 2016. Vol. 23, N 2. P. 369–391.
11. *Eybpoosh M., Bergés M., & Noh H. Y.* An energybased sparse representation of ultrasonic guided-waves for online damage detection of pipelines under varying environmental and operational conditions // Mechanical Systems and Signal Processing. 2017. Vol. 82. P. 260–278.
12. *Farrar C. R., & Worden K.* An introduction to structural health monitoring // Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 2007. Vol. 1851, N 365. P. 303–315.
13. *Davis J., Goadrich M.* The Relationship between Precision-Recall and ROC Curves // Proc. of 23 Intern. Conf. on Machine Learning. Pittsburgh, PA, 2006.
14. *Lowe M. J., Alleyne D. N., & Cawley P.* Defect detection in pipes using guided waves // Ultrasonics. 1998. Vol. 36, N 1-5. P. 147–154.
15. *Kharrat M., Zhou W., Bareille O., Ichchou M.* Defect detection in pipes by torsional guided-waves: a tool of recognition and decision-making for the inspection of pipelines // Proc. of the 8th Intern. Conf. on Structural Dynamics, EURO DYN 2011. Leuven, Belgium, 4–6 July 2011. P. 2272–2279.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Роман Викторович Корнеев

— аспирант; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Институт машиностроения, материалов и транспорта, Международный научно-образовательный центр „BaltTribo-Polytechnic“; E-mail: krvthecreator@gmail.com

Маргарита Александровна Скотникова

— д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Институт машиностроения, материалов и транспорта, Международный научно-образовательный центр „BaltTribo-Polytechnic“; руководитель, профессор МНОЦ „BaltTribo-Polytechnic“; E-mail: skotnikova@mail.ru

Алексей Александрович Альхименко

— канд. техн. наук; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Высшая школа передовых цифровых технологий; доцент; Научно-технологический комплекс „Новые технологии и материалы“; директор; E-mail: 9586435@mail.ru

Поступила в редакцию 03.07.24; одобрена после рецензирования 12.07.24; принята к публикации 22.10.24.

REFERENCES

1. Medvedeva M.L. *Osnovy elektrokhimicheskoy korrozii i zashchity oborudovaniya pri transporte i khraneniі nefti i gaza* (Fundamentals of Electrochemical Corrosion and Equipment Protection During Transportation and Storage of Oil and Gas), Moscow, 2004, 102 p. (in Russ.)

2. Gerasimov V.V. *Prognozirovaniye korrozii metallov* (Forecasting of Metal Corrosion), Moscow, 1989, 151 p. (in Russ.)
3. Mustafin F.M. et al. *Zashchita truboprovoda ot korrozii* (Pipeline Corrosion Protection), Vol. 1, St. Petersburg, 2005, 617 p. (in Russ.)
4. Vorobyeva G.Ya. *Korroziionnaya stoykost' materialov v korroziionnykh sredakh khimicheskikh proizvodstv* (Corrosion Resistance of Materials in Corrosive Environments of Chemical Industries), Moscow, 1975, 300 p. (in Russ.)
5. Shumaylov A.S., Gumenov A.G., Moldovanov O.I. *Diagnostika magistral'nykh truboprovodov* (Diagnostics of Main Pipeline), Moscow, 1992, 251 p. (in Russ.)
6. Prusenko B.E., Martynyuk V.F., eds., *Analiz avariyy i neschastnykh sluchayev na truboprovodnom transporte Rossii* (Analysis of Accidents and Incidents in Pipeline Transport in Russia), Moscow, 2003, 351 p. (in Russ.)
7. Lucà F., Manzoni S., Cigada A., Barella S., Gruttadauria A., and Cerutti F. *Sensors*, 2022, no. 4(22), pp. 1370.
8. Awadallah O., Sadhu A. *Journal of Infrastructure Intelligence and Resilience*, 2023, no. 1(2), pp. 100024.
9. El Mountassir M., Mouro G., Yaacoubi S., Maquin D. *IFAC-PapersOnLine*, France, 2018, no. 24(51), pp. 941–948.
10. Eybpoosh M., Bergés M., & Noh H.Y. *Structural Control and Health Monitoring*, 2016, no. 2(23), pp. 369–391.
11. Eybpoosh M., Bergés M., & Noh H.Y. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2017, vol. 82, pp. 260–278.
12. Farrar C.R., & Worden K. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2007, no. 365(1851), pp. 303–315.
13. Davis J., Goadrich M. *Proc. of 23 Intern. Conf. on Machine Learning*, Pittsburgh, PA, 2006.
14. Lowe M.J., Alleyne D.N., & Cawley P. *Ultrasonics*, 1998, no. 1-5(36), pp. 147–154.
15. Kharrat M., Zhou W., Bareille O., Ichchou M. *Proc. of the 8th Intern. Conf. on Structural Dynamics*, EURO DYN 2011, Leuven, Belgium, 4–6 July 2011, pp. 2272–2279.

DATA ON AUTHORS

- Roman V. Korneev** — Post-Graduate Student; Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Institute of Mechanical Engineering, International Scientific-Educational Center BaltTribo-Polytechnic; E-mail: krvthecreator@gmail.com
- Margarita A. Skotnikova** — Dr. Sci., Professor; Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Institute of Mechanical Engineering, International Scientific-Educational Center BaltTribo-Polytechnic; Head of the Center; E-mail: skotnikova@mail.ru
- Alexey A. Alkhimenko** — PhD, Associate Professor; Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Higher School of Advanced Digital Technologies, Scientific and Technological Complex New Technologies and Materials; Director of the Complex; E-mail: 9586435@mail.ru

Received 03.07.24; approved after reviewing 12.07.24; accepted for publication 22.10.24.