Оригинальная статья

Original Paper

УДК 658.581:621.643 © К.М. Трофимов, Р.К. Халкечев✉, 2026

НИТУ МИСИС, 119049, г. Москва, Россия
✉ e-mail: syrus@list.ru

UDC 658.581:621.643 © K.M. Trofimov, R.K. Khalkechev✉, 2026

National University of Science and Technology MISIS (NUST MISIS), Moscow, 119049, Russian Federation
✉ e-mail: syrus@list.ru

О состоянии и методах предиктивного обслуживания трубопроводов на горнодобывающих предприятиях. Перспективы применения нечеткого моделирования

On the state and methods of predictive maintenance of pipelines at mining enterprises. Prospects for the application of fuzzy modeling

DOI: http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2026-8-62-64

ТРОФИМОВ К.М.
Аспирант кафедры Инфокоммуникационных технологий Университета науки и технологий, НИТУ МИСИС, 119049, г. Москва, Россия, e-mail: trofimovkonstantin2002@gmail.com

ХАЛКЕЧЕВ Р.К.
Доктор техн. наук, профессор кафедры Инфокоммуникационных технологий Университета науки и технологий, НИТУ МИСИС, 119049, г. Москва, Россия, e-mail: syrus@list.ru

В представленной статье проведен анализ современного состояния исследований в области предиктивного обслуживания трубопроводных систем на горнодобывающих предприятиях. Установлено, что модели, разработанные в рамках механического подхода, обладают большей степенью количественной адекватности по сравнению с теми, что получены с применением машинного обучения и искусственного интеллекта. Однако вынужденная ошибка во входных параметрах таких моделей (невозможно задать точные значения по всей длине трубопровода) снижает ценность получаемых результатов. Для решения данной проблемы предложен подход, основанный на нечетком моделировании процессов разрушения. При этом необходимо отметить, что в данном случае теория нечетких множеств используется в качестве обобщения теории ошибок, а не для выражения экспертных оценок. Применение предлагаемого подхода позволяет разрабатывать структурно устойчивые модели.

Ключевые слова: *предиктивное обслуживание, трубопровод, прогнозирование, нечеткое моделирование, продольные напряжения, модель, структурная устойчивость, машинное обучение.*

Для цитирования: Трофимов К.М., Халкечев Р.К. О состоянии и методах предиктивного обслуживания трубопроводов на горнодобывающих предприятиях. Перспективы применения нечеткого моделирования // Уголь. 2026;(8):62-64. DOI: 10.18796/0041-5790-2026-8-62-64.

Abstract

The presented article analyzes the current state of research in the field of predictive maintenance of pipeline systems at mining enterprises. It is established that models developed within the framework of the mechanical approach demonstrate a higher degree of quantitative adequacy compared to those obtained using machine learning and artificial intelligence. However, the inherent uncertainty in the input parameters of such models (it is impossible to specify exact values along the entire length of the pipeline) reduces the value of the obtained results. To address this issue, an approach based on fuzzy modeling of degradation processes is proposed. It should be noted that, in this case, fuzzy set theory is used as a generalization of error

theory rather than as a means of expressing expert judgments. The application of the proposed approach makes it possible to develop structurally robust models.

Keywords

Predictive maintenance, pipeline, forecasting, fuzzy modeling, longitudinal stresses, model, structural stability, machine learning.

For citation

Trofimov K.M., Khalkechev R.K. On the state and methods of predictive maintenance of pipelines at mining enterprises. Prospects for the application of fuzzy modeling. *Ugol'*. 2026;(8):62-64. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2026-8-62-64.

ВВЕДЕНИЕ

Функционирование горнодобывающих предприятий сопряжено с эксплуатацией оборудования в условиях повышенного износа, агрессивных сред и значительных динамических нагрузок. Одним из наиболее уязвимых элементов технологических процессов горнодобывающих предприятий являются трубопроводные системы. Они обеспечивают транспортировку пульпы, воды, хвостов обогащения, а также химически активных реагентов. Отказ трубопровода не только приводит к остановке производственного цикла, но и создает серьезные угрозы промышленной безопасности, экологии и экономической эффективности предприятия.

Практика показывает, что наиболее эффективной стратегией обеспечения работоспособности трубопроводов является предиктивное обслуживание [1]. Данный вид обслуживания базируется на непрерывном мониторинге параметров состояния трубопроводов – измерении толщины стенки, анализе гидравлических характеристик и др., позволяющих прогнозировать остаточный ресурс эксплуатируемых трубопроводных систем [2]. Внедрение таких методов позволяет не только предотвратить аварийные остановки, но и оптимизировать ремонтный бюджет, переходя от тотальной замены к точечным ремонтам по фактическому состоянию. В то же время практика показывает, что эффективность существующих методологий предиктивного обслуживания существенно ограничена малой точностью прогноза остаточного ресурса трубопроводов. В результате этого осуществляется преждевременная замена участков трубопроводов.

В сложившейся ситуации анализ современного состояния исследований в области методологий предиктивного обслуживания трубопроводов и выявления на этой основе подходов к повышению их эффективности является актуальной научной задачей горнодобывающей промышленности.

ОСНОВНОЙ РАЗДЕЛ

Анализ научных работ в области предиктивного обслуживания трубопроводов свидетельствует о существовании двух подходов к разработке моделей и методов, лежащих в основе применяемых автоматизированных средств. Первый из них, являющийся наиболее распространенным подходом, основан на разработке и применении моделей машинного обучения и искусственного интеллекта. Среди научных работ в данном направлении необходимо отметить труды [2, 3, 4 и др.]. В рамках данного подхода предиктивное обслуживание трубопроводов сводится к сбору данных с датчиков, обучении моделей на ретроспективных данных и прогнозировании будущих отказов. К достоинству такого подхода можно отнести возможность выявления скрытых закономерностей в собранных ретроспективных данных об авариях трубопроводов, которые традиционными методами контроля не были обнаружены. В свою очередь недостатками рассматриваемого подхода являются: высокая стоимость внедрения, обусловленная необходимостью приобретения большого количества датчиков и вычислительных ресурсов; необходимость получения большого объема качественных ретроспективных данных; сложность интерпретации результатов моделирования – зачастую неизвестно, по какой причине использованная модель предсказала отказ и какие факторы повлияли на прогноз; недостаточный учет коррозионного износа стенок труб.

Следующий подход к предиктивному обслуживанию, часто называемый механическим, основан на исследовании физических процессов, происходящих в трубопроводе. В рамках данного подхода вместо «обучения на данных» разрабатываются математические модели, позволяющие осуществлять прогноз остаточного ресурса трубопровода на основе фундаментальных законов физики.

В рамках рассматриваемого подхода можно выделить следующие основные типы моделей [5, 6 и др.]: 1) гидродинамические 2) модели коррозии; 3) модели напряженно-деформированного состояния и трещинообразования.

К достоинствам моделей, разработанных в рамках механического подхода, можно отнести их высокую степень физической обоснованности, независимость от больших данных и возможность анализировать нестандартные ситуации (например, аварийные режимы, экстремальные температуры и др.). При этом главным недостатком механического подхода является то, что разрабатываемые с его помощью модели требуют задания в каждой точке сплошной среды большого количества параметров с высокой степенью точности, что в реальных условиях функционирования технологического процесса не представляется возможным [2]. Вследствие этого ошибка во входных данных часто может приводить к большим изменениям в конечных результатах.

Таким образом, модели, разработанные в рамках механического подхода, обладают большей степенью количественной адекватности по сравнению с теми, что получены в рамках машинного обучения и искусственного интеллекта. Однако вынужденная ошибка во входных параметрах таких моделей (невозможно задать точные значения по всей длине трубопровода) снижает ценность получаемых результатов.

В сложившейся ситуации для решения задач предиктивного обслуживания трубопроводов можно предложить подход, основанный на нечетком моделировании процессов разрушения. Основы такого подхода, сформулированные для задач разрушения геоматериалов, изложены в работах [7, 8, 9, 10, 11 и др.]. При этом, как и в механическом подходе, в рамках нечеткого моделирования разрабатываются решения, основанные на фундаментальных законах физики. Однако в отличие от моделей механического подхода в этом случае входные параметры определяются в нечетком виде. При этом необходимо отметить, что в

данном случае теория нечетких множеств используется в качестве обобщения теории ошибок, а не для выражения экспертных оценок [12]. Так, например, фундаментальное выражение для расчета продольных напряжений в трубе в рамках нечеткого моделирования может быть преобразовано в следующее выражение:

$$\sigma_z = \nu \frac{\tilde{p}(\rho, \vartheta, \mu) r}{d} - E\alpha\Delta\tilde{T},$$

где ν, E и α – соответственно коэффициент Пуассона, модуль Юнга и коэффициент линейного расширения материала трубы; r – радиус трубы; $\tilde{p}(\rho, \vartheta, \mu)$ – нечеткая функция давления от плотности ρ, скорости потока ϑ и вязкости μ жидкости; $\Delta\tilde{T}$ – нечеткая разность температур на заданном участке; d – толщина трубы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного анализа современного состояния исследований в области предиктивного обслуживания трубопроводных систем на горнодобывающих предприятиях выявлены достоинства и недостатки существующих методологий. Установлено, что модели, разработанные в рамках механического подхода, обладают большей степенью количественной адекватности по сравнению с теми, что получены с применением машинного обучения и искусственного интеллекта. Однако вынужденная ошибка во входных параметрах таких моделей (невозможно задать точные значения по всей длине трубопровода) снижает ценность получаемых результатов. Для решения данной проблемы предложен подход, основанный на нечетком моделировании процессов разрушения. Такой подход позволит разрабатывать структурно устойчивые модели, для которых малые изменения значений входных параметров приводят к малым изменениям полученных решений.

Список литературы • References

1. Hussain M., Zhang T. Big Data Analytics in Energy Pipeline Integrity Management. Singapore: Springer Nature Singapore, 2025. 330 p.
2. Timashev S., Bushinskaya A. Diagnostics and Reliability of Pipeline Systems. Cham: Springer International Publishing, 2016. 407 p.
3. Tawk M., Mustapha S., Trad F., Saad G. Service life prediction in pipelines using machine learning techniques. *International Journal of Computational Intelligence Systems.* 2025;(18):319. DOI: 10.1007/s44196-025-01058-1.
4. Hussain M., Zhang T., Dwight R., Jamil I. Energy pipeline degradation condition assessment using predictive analytics – challenges, issues, and future directions. *Journal of Pipeline Science and Engineering*. 2024;(4):100178. DOI: 10.1016/j.jpse.2024.100178.
5. Zhang W., Fu X., Hu M., Xu K., Dai K., Shi J., Ji Y., Dong C. Effects of external corrosion defect growth on wall pipeline under internal pressure and various defect sizes with mechano-electrochemical interaction. *Materials and Corrosion*. 2024;(75):1348–1358. DOI: 10.1002/maco.202414391.
6. Prokopyev L.A., Golikov N.I., Saraev Yu.N. Crack Growth in the Field of Residual Stresses in Welded Joints of Pipelines Used in a Cold Climate. *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. 2024;(5): 159-169. DOI: 10.17804/2410-9908.2024.5.159-169.
7. Нечеткая модель определения формы устойчивого целика в углевмещающих породах / Р.К. Халкечев, Ю.М. Левкин, К.В. Халкечев и др. // Уголь. 2024;(1):61-63. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-1-61-63.
   Khalkechev R.K., Levkin Yu.M., Khalkechev K.V., Kuzmenko S.Yu. Fuzzy model of the shape determining of a stable pillar in coal-bearing rocks. *Ugol'.* 2024;(1):61-63. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2024-1-61-63.
8. Халкечев Р.К. Нечеткая математическая модель изменения концентрации трещин в минерале под действием внешней нагрузки // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2019. № 6. С. 97-105. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-06-0-97-105.
   Khalkechev R.K. Fuzzy mathematical model of fracture concentration changes in a mineral under external load. *Gornyj informatsionno-analiticheskij byulleten'.* 2019;(6):97-105. (In Russ.). DOI: 10.25018/0236-1493-2019-06-0-97-105.
9. Халкечев Р.К. Применение теории мультифрактального моделирования процессов деформирования и разрушения породных массивов с целью краткосрочного прогнозирования внезапных выбросов угля и газа // Уголь. 2019;(7):48-50. DOI: 10.18796/0041-5790-2019-7-48-50
   Khalkechev R.K. Multifractal modeling theory application of rock mass deformation and destruction processes with the aim of short-term forecasting sudden coal and gas outbursts. *Ugol'*. 2019;(7):48-50. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2019-7-48-50
10. Халкечев К.В., Левкин Ю.М., Абрамкин Н.И. Разработка математической модели поля напряжений в окрестности магистральной трещины продольного сдвига в кровле горной выработки // Уголь. 2024;(7):52-54. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-7-52-54.
    Khalkechev K.V., Levkin Yu.M., Abramkin N.I. Development of a mathematical model of the stress field in the vicinity of a longitudinal shear main crack in the mine roof. *Ugol'*. 2024;(7):52-54. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2024-7-52-54.
11. Халкечев Р.К., Левкин Ю.М., Халкечев К.В. Разработка математической модели поля напряжений в целиках слоистой текстуры на угольных месторождениях // Уголь. 2023;(8):84-86. DOI: 10.18796/0041- 5790-2023-8-84-86.
    Khalkechev R.K., Levkin Yu.M., Khalkechev K.V. Mathematical model development of the stress field in the pillars stratified texture in coal deposits. *Ugol'*. 2023;(8):84-86. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2023-8-84-86.
12. Чуличков И.А. Математические методы нелинейной динамики. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2000. 296 с.

Authors Information

Trofimov K.M. – Postgraduate Student of the Department of Information and Communication Technologies at the University of Science and Technology of the National University of Science and Technology MISIS (NUST MISIS), Moscow, 119049, Russian Federation, e-mail: trofimovkonstantin2002@gmail.com

Khalkechev R.K. – Doctor of Engineering Science, Professor of the Department of Information and Communication Technologies at the University of Science and Technology of the National University of Science and Technology MISIS (NUST MISIS), Moscow, 119049, Russian Federation, e-mail: syrus@list.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 30.04.2026
Поступила после рецензирования: 17.07.2026
Принята к публикации: 30.07.2026

Paper info

Received April 30, 2026
Reviewed July 17, 2026
Accepted July 30, 2026