



## АКУСТИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ УТЕЧЕК ТРУБОПРОВОДОВ НА ОСНОВЕ ФРАКТАЛЬНОГО АНАЛИЗА СИГНАЛОВ

Загретдинов А.Р., Зиганшин Ш.Г., Клюкин И.И., Александров Р.Н.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

zagretdinov.ar@kgeu.ru

**Резюме:** АКТУАЛЬНОСТЬ заключается в разработке нового подхода к обнаружению утечек трубопроводов, основанного на фрактальном анализе акустических сигналов. Предложенный подход позволяет повысить достоверность обнаружения утечек за счет упрощения интерпретации результатов измерений, исключения ошибок в принятии решения. ЦЕЛЬ. Исследовать изменения фрактальной структуры колебаний трубопроводов на разном удалении от места утечки. МЕТОДЫ. Для анализа акустических сигналов применялись методы нормированного размаха (R/S-анализ) и детрендрованного флуктуационного анализа (detrended fluctuation analysis, DFA). Проведены лабораторные и полевые эксперименты на трубах из разных материалов (полиэтилен, полипропилен, металлопластик, сталь). РЕЗУЛЬТАТЫ. Установлено, что для герметичных трубопроводов характерен высокий уровень показателя Херста акустических сигналов. Снижение этого уровня свидетельствует о возникновении утечки. С увеличением расстояния между виброакустическим датчиком и утечкой линейно возрастает показатель Херста регистрируемых сигналов. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Проведенные экспериментальные исследования подтверждают возможность контроля утечек трубопроводов по анализу показателя Херста акустических сигналов. При мониторинге участка трубопровода, на котором предполагается наличие утечки, рекомендуется устанавливать несколько датчиков. Сигнал с наименьшим значением показателя Херста будет регистрировать датчик, расположенный ближе всего к источнику утечки.

**Ключевые слова:** мониторинг утечек; акустический сигнал; показатель Херста; метод нормированного размаха; детрендрованный флуктуационный анализ.

**Благодарности:** Работа выполнена за счет гранта, предоставленного Академией наук Республики Татарстан образовательным организациям высшего образования, научным и иным организациям на поддержку планов развития кадрового потенциала в части стимулирования их научных и научно-педагогических работников к защите докторских диссертаций и выполнению научно-исследовательских работ.

**Для цитирования:** Загретдинов А.Р., Зиганшин Ш.Г., Клюкин И.И., Александров Р.Н. Акустический мониторинг утечек трубопроводов на основе фрактального анализа сигналов // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2026. Т. 28. № 3. С. 16-25. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-3-16-25.

## ACOUSTIC MONITORING OF PIPELINE LEAKS BASED ON FRACTAL ANALYSIS OF SIGNAL

Zagretdinov A.R., Ziganshin Sh.G., Klyukin I.I., Alexandrov R.N.

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

zagretdinov.ar@kgeu.ru

**Abstract:** The RELEVANCE of the present study is to develop a new approach to pipeline leak detection based on fractal analysis of acoustic signals. The proposed approach improves the reliability of leak detection by simplifying the interpretation of measurement results and eliminating errors in decision-making. OBJECT. To study changes in the fractal structure of pipeline vibrations at different distances from the leak site. METHODS. To analyze the acoustic signals, the methods of normalized range (R/S analysis) and detrended fluctuation analysis

(DFA) were used. Laboratory and field experiments were conducted on pipes made of different materials (polyethylene, polypropylene, metal-plastic, steel). **RESULTS.** It was found that sealed pipelines are characterized by a high level of the Hurst exponent of acoustic signals. A decrease in this level indicates a leak. With increasing distance between the vibroacoustic sensor and the leak, the Hurst exponent of the recorded signals increases linearly. **CONCLUSION.** Experimental studies confirm the feasibility of monitoring pipeline leaks by analyzing the Hurst exponent of acoustic signals. When monitoring a suspected leak section of a pipeline, it is recommended to install multiple sensors. The signal with the lowest Hurst exponent value will be recorded by the sensor located closest to the leak source.

**Keywords:** leak monitoring; acoustic signal; Hurst exponent; normalized range method; detrended fluctuation analysis.

**Acknowledgments:** This work was supported by a grant from the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan to higher education institutions, scientific and other organizations to support plans for the development of human resources in terms of stimulating their scientific and teaching staff to defend doctoral dissertations and carry out research work.

**For citation:** Zagretidinov A.R., Ziganshin Sh.G., Klyukin I.I., Alexandrov R.N. Acoustic monitoring of pipeline leaks based on fractal analysis of signal. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2026; 28 (3): 16-25. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-3-16-25.

#### **Введение (Introduction)**

В разветвленных трубопроводных системах для раннего выявления утечек используются системы акустического мониторинга. Их принцип работы заключается в регистрации акустических волн с помощью акселерометров, размещенных на внешней стороне трубопровода. Индикатором появления утечки обычно служит изменение амплитуды информативных гармоник акустического сигнала [1,2]. Как правило, эти гармоники заранее не известны, а наличие множества спектральных составляющих усложняет анализ данных и приводит к ошибкам в принятии решения.

В современных исследованиях активно рассматривается применение искусственных нейронных сетей для акустического обнаружения утечек [3-5]. Однако такой подход имеет ряд ограничений: зависимость результатов от качества и объема обучающей выборки, сложность обучения и высокие требования к мощностям вычислительных устройств. В связи с этим задача разработки недорогого и простого метода контроля герметичности трубопроводов остается актуальной.

Теория фракталов, разработанная Бенуа Мандельбротом, является мощным инструментом для анализа, обработки и классификации данных, особенно когда речь идет о сложных, нерегулярных и самоорганизующихся структурах. Фрактальный анализ широко используется в разных областях науки: экономике [6,7], медицине [8,9], метеорологии [10,11], физике [12,13] и др.

Акустические сигналы в трубопроводах, подобно многим природным процессам, обладают свойствами фрактального масштабирования. В статье предлагается использовать фрактальный анализ для выявления сложных закономерностей в акустических сигналах, которые могут быть связаны с утечками в трубопроводной системе.

Целью работы является исследование изменения фрактальной структуры колебаний трубопроводов на разном удалении от места утечки. Для этого были проведены экспериментальные исследования в лабораторных и полевых условиях.

Значимость представленной работы заключается в формировании научных основ мониторинга герметичности трубопроводных сетей с применением фрактального анализа акустических сигналов. Предложенный подход позволяет повысить достоверность обнаружения утечек за счет упрощения интерпретации результатов измерений, исключения ошибок в принятии решения.

#### **Материалы и методы (Materials and methods)**

Фрактальный анализ временных рядов, как правило, проводится с вычислением показателя Херста  $H$ , который связан с фрактальной размерностью  $D$  следующим образом:

$$H = 2 - D. \quad (1)$$

Если  $H=0,5$  исследуемый процесс считается случайным (такое значение  $H$

соответствует броуновскому движению).  $H=0,5 \div 1$  означает персистентный процесс, который характеризуется долговременной памятью (когда последующие показатели сильно зависят от прошедших). При значениях  $H=0 \div 0,5$  процесс считается антиперсистентным, это указывает на то, что система отличается частыми, но небольшими изменениями.

В настоящей работе для оценки показателя Херста акустических сигналов применялись методы нормированного размаха (Rescaled range (R/S) analysis) и детрендированного флуктуационного анализа (detrended fluctuation analysis, DFA).

R/S-анализ разработан Г.Э. Херстом для решения задач, связанных с накоплением водных ресурсов и получил дальнейшее развитие в работах Б. Мандельброта. Идея метода состоит в том, что существует степенная зависимость вида [14]:

$$R/S \sim c \cdot \delta^H, \quad (2)$$

где  $R$  – размах вариации (под вариацией показателя понимается накопленное отклонение его от среднего значения),  $S$  – стандартное отклонение показателя,  $\delta$  – количество значений показателя в группе,  $c$  – некоторая константа.

Детрендированный флуктуационный анализ предложен Ч.-К. Пенгом и др. в статье [15], посвященной изучению организации нуклеотидов ДНК. В основе метода лежит предположение, что для самоподобных процессов имеется следующая степенная зависимость:

$$F(\delta) \sim \delta^H, \quad (3)$$

где  $F(\delta)$  – флуктуационная функция.

Блок-схемы алгоритмов R/S-анализа и DFA представлены на рисунке 1.

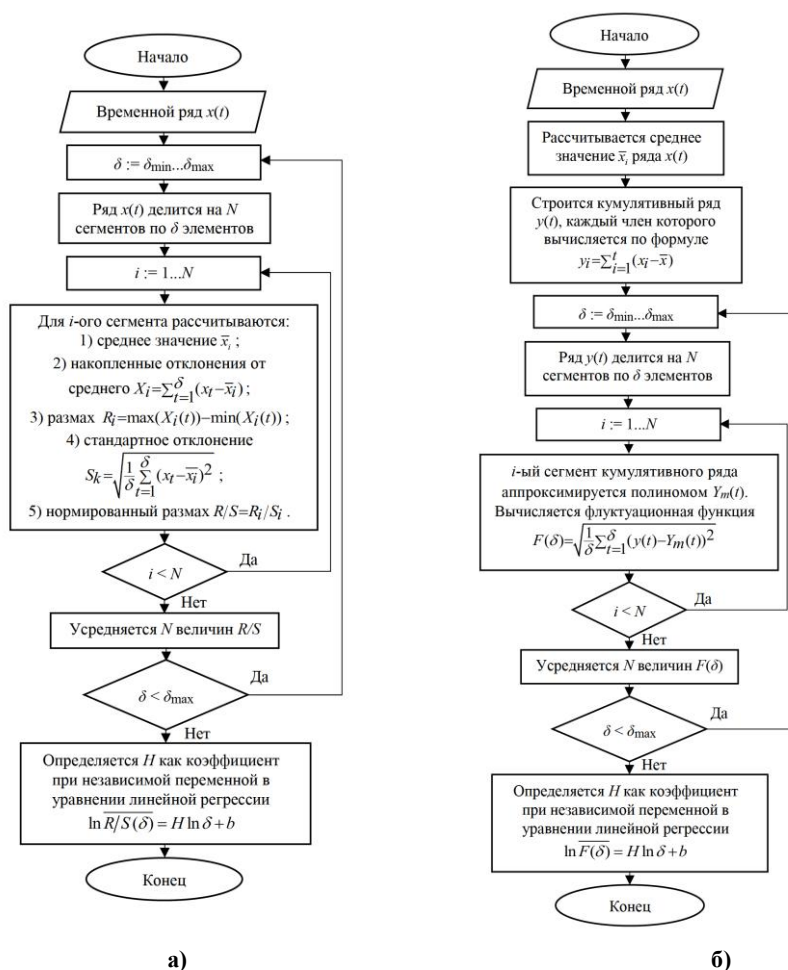


Рис. 1. Блок-схемы алгоритмов: а) R/S-анализа; Fig. 1. Block diagrams of algorithms: а) R/S analysis; б) DFA

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Степень аппроксимирующего полинома  $Y_m(t)$  определяет порядок метода DFA, например, метод DFA-1 – предполагает вычитание линейного тренда, DFA-2 – квадратичного тренда и т. д. Для анализа акустических сигналов в работе применялся

метод DFA-1. Более подробно влияние порядка аппроксимирующего полинома на результаты расчета показателя Херста акустических сигналов утечек обсуждается в статье [16].

### **Результаты и обсуждение (Results and discussions)**

#### **Лабораторные исследования**

На лабораторном стенде, представляющем собой замкнутый гидравлический контур (рис. 2), были экспериментально изучены фрактальные характеристики колебаний трубопроводов на разном удалении от места утечки. Исследования проводились на полиэтиленовой и металлопластиковой трубах с наружным диаметром 32 мм.

В ходе экспериментов моделировался дефект стенки трубы в виде круглого отверстия диаметром 5 мм. В качестве модели дефекта использовались стальной диск, представленный на рисунке 3.

Диск устанавливался на ответвлении и зажимался шаровым краном, при этом отвод воды осуществлялся через резиновый шлаг (рис. 4). В случае закрытого крана состояние трубопровода считалось бездефектным, в случае открытого – дефектным.

Колебания трубопровода регистрировались датчиком вибрационного ускорения AP-2038P-1000 (коэффициент преобразования – 1000 мВ/г, собственная частота – 35 кГц) на разном удалении от места установки диска. Сигналы записывались в память компьютера с частотой дискретизации 50 кГц.



Рис. 2. Экспериментальный стенд с полиэтиленовым трубопроводом  
*Fig. 2. Experimental stand with a polyethylene pipeline*

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.



Рис. 3. Диск с отверстием диаметром 5 мм

*Fig. 3. Disc with a hole of 5 mm diameter*

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.



Рис. 4. Место установки диска

*Fig. 4. Disk installation location*

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

С использованием методов R/S анализа и DFA-1 был рассчитан показатель Херста акустических сигналов. Анализировались сигналы длиной 20 тысяч отсчетов, нормированный размах  $R/S(\delta)$  и флуктуационная функция  $F(\delta)$  рассчитывались на участках сигнала длиной  $\delta=16\div 1024$  отсчетов. Указанный диапазон охватывает характерные масштабы, на которых обычно наблюдается устойчивое степенное (скейлинговое) поведение [16-18].

На рисунках 5 и 6 представлены результаты анализа показателя Херста

акустических сигналов, полученных в ходе лабораторных экспериментов. Из рисунков видно, что для герметичных трубопроводов характерна высокая персистентность акустических сигналов ( $H \geq 1$ ). Снижение уровня персистентности сигналов (их показателя Херста) свидетельствует о возникновении утечки. При этом, чем ближе расположен датчик к утечке, тем ниже значение  $H$ . С увеличением дистанции «датчик-утечка» показатель Херста возрастает по линейному закону.

Значения  $H$  сигналов герметичного трубопровода, рассчитанные методом DFA-1, значительно превышают уровень детерминированного процесса (значительно больше единицы). Это указывает на то, что в сигналах присутствуют нестационарные изменения локального среднего [19].

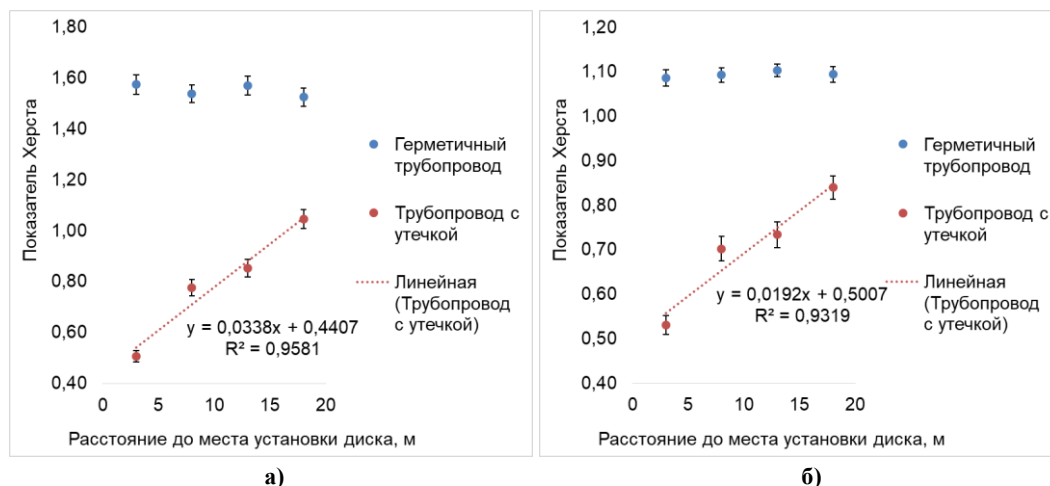


Рис. 5. Результаты анализа колебаний полиэтиленового трубопровода с применением разных методов: а) DFA-1; б) R/S-анализа

Fig. 5. Results of the analysis of vibrations of a polyethylene pipeline using different methods: a) DFA-1; b) R/S analysis

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

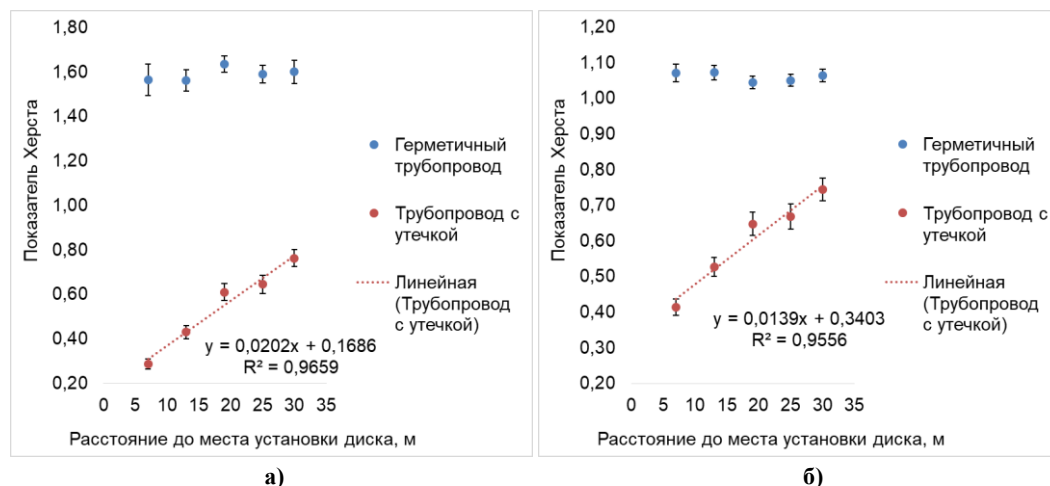


Рис. 6. Результаты анализа колебаний металлопластикового трубопровода с применением разных методов: а) DFA-1; б) R/S-анализа

Fig. 6. Results of the vibration analysis of a metal-plastic pipeline using different methods: a) DFA-1; b) R/S analysis

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

#### Полевые исследования

По описанной выше методике проведены исследования на полипропиленовом (условный диаметр  $Dy=50$  мм) и стальном ( $Dy=100$  мм) трубопроводах системы водоснабжения общественного здания. Эксперименты проводились в дневное время. Для имитации дефекта трубопровода использовался стальной диск со сквозным отверстием диаметром 5 мм. Диск устанавливался на запорном кране и зажимался резьбовым фитингом, слив воды осуществлялся через резиновый шлаг. Фотографии трубопроводов и места установки модели дефекта представлены на рисунках 7-9.



Рис. 7. Фотография места установки диска на стальном трубопроводе  
*Fig. 7. Photograph of the installation location of the disk on a steel pipeline*  
\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.



Рис. 8. Фотография полипропиленового трубопровода  
*Fig. 8. Photograph of a polypropylene pipeline*  
\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.



Рис. 9. Фотография места установки диска на полипропиленовом трубопроводе  
*Fig. 9. Photograph of the installation location of the disk on a polypropylene pipeline*  
\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

На рисунках 10 и 11 представлены результаты анализа показателя Херста акустических сигналов, полученных в ходе полевых экспериментов. Полученные результаты подтверждают выводы, сделанные на основании лабораторных исследований. При удалении датчика от утечки увеличивается показатель Херста. Это связано с затуханием высокочастотных составляющих сигнала. В полипропиленовом трубопроводе этот эффект затухания выражен сильнее, чем в стальном. Например, при расстоянии от датчика до места утечки 30 метров для полипропиленового трубопровода  $H=1,13$ , для стального –  $H=0,21$  (см рис. 10 а и 11 а). Результаты согласуются с опытом применения акустических корреляционных течеискателей. Как правило, частотный спектр утечки в пластиковом трубопроводе сосредоточен в диапазоне 10-20 Гц, а 90 метров – это практически предельное расстояние между датчиками накладного типа при обнаружении утечек корреляционным методом на пластиковых трубопроводах [20]. В статье [18] нами ранее было установлено, что в полосе частот 0 до 2 кГц находятся спектральные составляющие, вносящие основной вклад во фрактальную структуру акустических сигналов утечки. Акустический сигнал утечки с частотой до 2 кГц может

распространяться по стальному трубопроводу на значительно большие расстояния (до 600 м), чем по пластиковому.

Следует отметить, что расстояние, на которое распространяется сигнал утечки, зависит не только от материала трубопровода, но и от его диаметра, давления воды, размера дефекта.

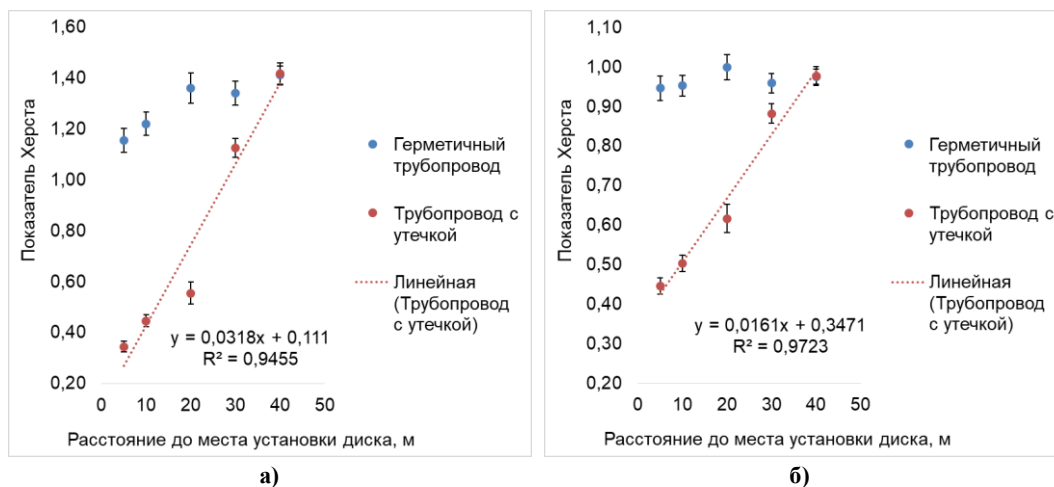


Рис. 10. Результаты анализа колебаний полипропиленового трубопровода с применением разных методов: а) DFA-1; б) R/S-анализа

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

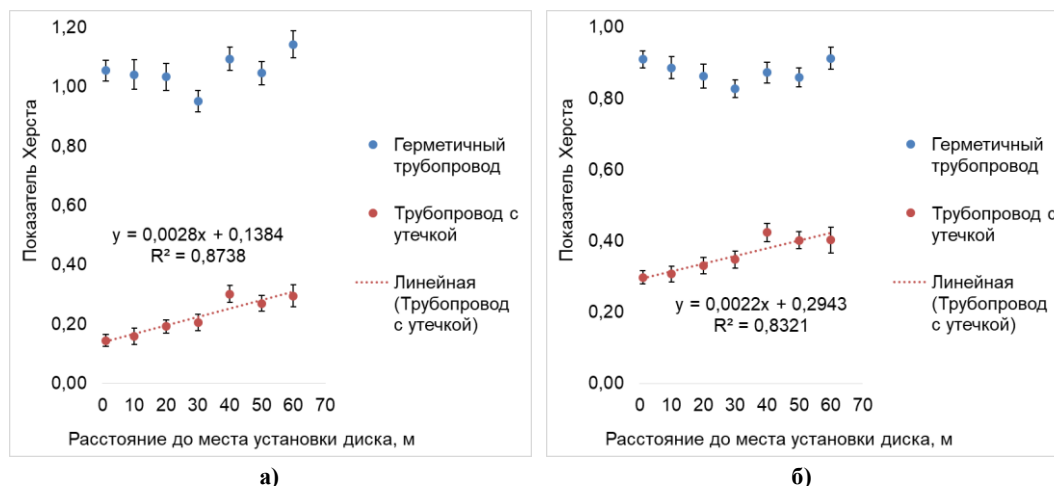


Рис. 11. Результаты анализа колебаний стального трубопровода с применением разных методов: а) DFA-1; б) R/S-анализа

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

### Заключение (Conclusions)

Проведенные экспериментальные исследования подтверждают возможность контроля утечек трубопроводов по анализу показателя Херста акустических сигналов.

Установлено, что появление утечки приводит снижению показателя Херста. Это связано с возникновением в месте дефекта турбулентных пульсаций воды. Звук утечки распространяется по стальному трубопроводу на значительно большее расстояние, чем по пластиковому.

С увеличением расстояния между датчиком и утечкой линейно возрастает показатель Херста. При мониторинге участка трубопровода, на котором предполагается наличие утечки, рекомендуется устанавливать несколько датчиков. Сигнал с наименьшим значением показателя Херста будет регистрировать датчик, расположенный ближе всего к источнику утечки.

### Литература

1. Клюев В.В., Соснин Ф.Р., Ковалев А.В. Неразрушающий контроль и

диагностика: справочник. – М.: Машиностроение. – 2005. – 656 с.

2. Маслов А.А. Мониторинг скрытых утечек в трубопроводах и незаконных врезок в сети // Наилучшие доступные технологии водоснабжения и водоотведения. – 2021. – №3. – С. 30-34.

3. Liu Y., Ma X., Li Y., Tie Y., Zhang Y., Gao J. Water pipeline leakage detection based on machine learning and wireless sensor networks // Sensors. – 2019. – №19. – 5086. – DOI: 10.3390/s19235086.

4. Wang W., Sun H., Guo J., Lao L., Wu S., Zhang J. Experimental study on water pipeline leak using in-pipe acoustic signal analysis and artificial neural network prediction // Measurement. – 2021. – №186. – 110094. – DOI: 10.1016/j.measurement.2021.110094.

5. Guo G., Yu X., Liu S., Ma Z., Wu Y., Xu X., Wang X., Smith K., Wu X. Leakage detection in water distribution systems based on time–frequency convolutional neural network // Journal of water resources planning and management. – 2021. – №147. – 04020101. – DOI: 10.1061/(asce)wr.1943-5452.0001317.

6. Jiang Z.Q., Xie, W.J., Zhou, W.X., Sornette, D. Multifractal analysis of financial markets: a review // Reports on progress in physics. – 2019. – Т. 82. – №12. – 125901. – DOI: 10.1088/1361-6633/ab42fb.

7. Zhang W., Huang Z. Nonlinear dynamics of RMB exchange rate volatility: a multifractal perspective within the G-expectation framework // Fractal and fractional. – 2025. – Т. 9. – №11. – 746. – DOI: 10.3390/fractalfract9110746.

8. Boztaş Demir G., Doğrugören R., Topsakal K.G., Duran G.S., Görgülü S. Assessment of mandibular trabecular bone structure in hypodivergent growth patterns using fractal analysis // Fractal and fractional. – 2025. – Т. 9. – №8. – 517. – DOI: 10.3390/fractalfract9080517.

9. Datta D., Sathish S. Application of fractals to detect breast cancer // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Т. 1377. – №1. – 012030. – DOI: 10.1088/1742-6596/1377/1/012030.

10. Zhong H., Guo Y. Long-term persistence in observed temperature and precipitation series // Fractal and Fractional. – 2025. – Т. 9. – №6. – 385. – DOI: 10.3390/fractalfract9060385

11. Аптуков В.Н., Митин В.Ю. Фрактальный анализ метеорологических рядов с помощью метода минимального покрытия // Географический вестник. – 2019. – №2(49). – С. 67-79. – DOI 10.17072/2079-7877-2019-2-67-79.

12. Кубарев А.Ю., Закирова А.Б., Кубарев Ю.Г. Методы исследования свойств дефектного электрооборудования // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2018. – Т. 20, № 3-4. – С. 108-115.

13. Лотфуллин Р. Ш., Кубарев А.Ю., Кубарев Ю.Г. Релаксационные свойства полидисперсных сегнетоэлектриков // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2016. – № 11-12. – С. 115-123.

14. Гарафутдинов Р.В. Моделирование и прогнозирование на финансовых рынках с применением фрактального анализа: монография. – Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2022. – 95 с.

15. Peng C.-K., Buldyrev S.V., Havlin S., Simons M., Stanley H.E., Goldberger A.L. Mosaic organization of DNA nucleotides // Physical review e. – 1994. – №49. – С. 1685-1689.

16. Zagretdinov A., Ziganshin S., Izmailova E., Vankov Y., Klyukin I., Alexandrov R. Detection of gate valve leaks through the analysis fractal characteristics of acoustic signal // Fractal and fractional. – 2024. – Т. 8. – №5. – 280. – DOI: 10.3390/fractalfract8050280.

17. Zagretdinov A., Ziganshin S., Izmailova E., Vankov Y., Klyukin I., Alexandrov R. Detection of pipeline leaks using fractal analysis of acoustic signals // Fractal and fractional. – 2024. – Т. 8. – №4. – 213. – DOI: 10.3390/fractalfract8040213.

18. Zagretdinov A., Ziganshin S., Izmailova E., Vankov Y., Klyukin I., Alexandrov R. Monitoring pipeline leaks using fractal analysis of acoustic signals // Fractal and fractional. – 2025. – Т. 9. – №3. – 178. – DOI 10.3390/fractalfract9030178.

19. Bashan A., Bartsch R., Kantelhardt J.W., Havlin S. Comparison of detrending methods for fluctuation analysis // Physica A: statistical mechanics and its applications. – 2008. – Т. 387. – №21. – С. 5080-5090. – DOI 10.1016/j.physa.2008.04.023.

20. Кошкин С.Ю. Особенности использования корреляционных теческателей для обнаружения утечек в пластиковых трубопроводах // Megatech. Новые технологии в промышленной диагностике и безопасности. – 2011. – №1. – С. 30-35.

#### Авторы публикации

**Загреддинов Айрат Рифкатович** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Промышленная

теплоэнергетика и системы теплоснабжения» Казанского государственного энергетического университета, г. Казань, Россия. *zagretdinov.ar@kgeu.ru*.

**Зиганшин Шамиль Газович** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения» Казанского государственного энергетического университета, г. Казань, Россия. *ziganshin.sg@kgeu.ru*.

**Клюкин Илья Игоревич** – аспирант Казанского государственного энергетического университета, г. Казань, Россия. *klyukin.ii@kgeu.ru*.

**Александров Роман Николаевич** – аспирант Казанского государственного энергетического университета, г. Казань, Россия. *aleksandrov.rm@kgeu.ru*.

### References

1. Klyuev V.V., Sosnin F.R., Kovalev A.V. Non-destructive testing and diagnostics: a handbook. - Moscow: Mashinostroenie. – 2005. – 656 p.
2. Maslov A.A. Monitoring hidden leaks in pipelines and illegal connections to networks // Best available technologies for water supply and sanitation. – 2021. – No. 3. – P. 30-34.
3. Liu Y., Ma X., Li Y., Tie Y., Zhang Y., Gao J. Water pipeline leakage detection based on machine learning and wireless sensor networks // Sensors. – 2019. – No. 19. – 5086. – DOI: 10.3390/s19235086.
4. Wang W., Sun H., Guo J., Lao L., Wu S., Zhang J. Experimental study on water pipeline leak using in-pipe acoustic signal analysis and artificial neural network prediction // Measurement. – 2021. – No. 186. – 110094. – DOI: 10.1016/j.measurement.2021.110094.
5. Guo G., Yu X., Liu S., Ma Z., Wu Y., Xu X., Wang X., Smith K., Wu X. Leakage detection in water distribution systems based on time–frequency convolutional neural network // Journal of water resources planning and management. – 2021. – No. 147. – 04020101. – DOI: 10.1061/(asce)wr.1943-5452.0001317.
6. Jiang Z.Q., Xie, W.J., Zhou, W.X., Sornette, D. Multifractal analysis of financial markets: a review // Reports on progress in physics. – 2019. – Vol. 82. – No. 12. – 125901. – DOI: 10.1088/1361-6633/ab42fb.
7. Zhang W., Huang Z. Nonlinear dynamics of RMB exchange rate volatility: a multifractal perspective within the G-expectation framework // Fractal and fractional. – 2025. – Vol. 9. – No. 11. – 746. – DOI: 10.3390/fractalfract9110746.
8. Boztaş Demir G., Doğrugören R., Topsakal K.G., Duran G.S., Görgülü S. Assessment of mandibular trabecular bone structure in hypodivergent growth patterns using fractal analysis // Fractal and fractional. – 2025. – Vol. 9. – No. 8. – 517. – DOI: 10.3390/fractalfract9080517.
9. Datta D., Sathish S. Application of fractals to detect breast cancer // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1377. – No. 1. – 012030. – DOI: 10.1088/1742-6596/1377/1/012030.
10. Zhong H., Guo Y. Long-term persistence in observed temperature and precipitation series // Fractal and Fractional. – 2025. – Vol. 9. – No. 6. – 385. – DOI: 10.3390/fractalfract9060385
11. Aptukov V.N., Mitin V.Yu. Fractal analysis of meteorological series based on the minimal covering method // Geographical Bulletin. – 2019. – No. 2 (49). – P. 67-79. – DOI 10.17072/2079-7877-2019-2-67-79.
12. Kubarev A.Yu., Zakirova A.B., Kubarev Yu.G. Research methods of the properties of defective electrical equipment // Power engineering: research, equipment, technology. – 2018. – Vol. 20, No. 3-4. – P. 108-115.
13. Lotfullin R.Sh., Kubarev A.Yu., Kubarev Yu.G. Distributed generation plants multi-agent controlling system // Power engineering: research, equipment, technology. – 2016. – No. 11-12. – P. 115-123.
12. Garafutdinov R.V. Modeling and forecasting in financial markets using fractal analysis: monograph. – Perm: Perm state national research university, 2022. – 95 p.
13. Peng C.-K., Buldyrev S.V., Havlin S., Simons M., Stanley H.E., Goldberger A.L. Mosaic organization of DNA nucleotides // Physical review e. – 1994. – No. 49. – P. 1685-1689.
14. Zagretdinov A., Ziganshin S., Izmailova E., Vankov Y., Klyukin I., Alexandrov R. Detection of gate valve leaks through the analysis of fractal characteristics of acoustic signal // Fractal and fractional. – 2024. – Vol. 8. – No. 5. – 280. – DOI: 10.3390/fractalfract8050280.
15. Zagretdinov A., Ziganshin S., Izmailova E., Vankov Y., Klyukin I., Alexandrov R. Detection of pipeline leaks using fractal analysis of acoustic signals // Fractal and fractional. –

2024. – Vol. 8. – No. 4. – 213. – DOI: 10.3390/fractalfract8040213.

16. Zagretdinov A., Ziganshin S., Izmailova E., Vankov Y., Klyukin I., Alexandrov R. Monitoring pipeline leaks using fractal analysis of acoustic signals // *Fractal and fractional*. – 2025. – Vol. 9. – No. 3. – 178. – DOI 10.3390/fractalfract9030178.

17. Bashan A., Bartsch R., Kantelhardt J.W., Havlin S. Comparison of detrending methods for fluctuation analysis // *Physica A: statistical mechanics and its applications*. – 2008. – Vol. 387. – No. 21. – P. 5080-5090. – DOI 10.1016/j.physa.2008.04.023.

18. Koshkin S.Yu. Features of using correlation leak detectors to detect leaks in plastic pipelines // *Megatech. New technologies in industrial diagnostics and safety*. – 2011. – No. 1. – P. 30-35.

#### **Authors of the publication**

**Ayrat R. Zagretdinov** – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.  
Email: zagretdinov.ar@kgeu.ru.

**Shamil G. Ziganshin** – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.  
Email: ziganshin.sg@kgeu.ru.

**Илья I. Klyukin** – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.  
Email: klyukin.ii@kgeu.ru.

**Roman N. Alexandrov** – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.  
Email: aleksandrov.rn@kgeu.ru.

*Шифр научной специальности: 2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды*

**Получено** **23.01.2026 г.**

**Отредактировано** **10.03.2026 г.**

**Принято** **17.03.2026 г.**