

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ДИАГНОСТИКИ НА НАДЕЖНОСТЬ ТРУБОПРОВОДОВ ТЕПЛОВЫХ СЕТЕЙ

Зиганшин Ш.Г., Базукова Э.Р., Гаврилов А.С.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

ziganshin.sg@kgeu.ru

Резюме: В статье дана количественная оценка влияния диагностики на показатели надежности трубопроводов тепловых сетей. **АКТУАЛЬНОСТЬ.** От надежной работы трубопроводных сетей зависит энергетическая и экономическая эффективность всей системы теплоснабжения. Однако влияние диагностики тепловых сетей на количественные показатели их надежности остается недостаточно изученным. **ЦЕЛЬ.** Целью работы является количественная оценка влияния диагностического контроля на показатели надежности трубопроводов тепловых сетей. **МЕТОДЫ.** Расчеты проведены с использованием экспоненциальной модели надежности. Проведено сценарное моделирование для трубопроводов тепловых сетей г. Казани с учетом различных уровней эффективности диагностики. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Получены зависимости вероятности безотказной работы и срока службы трубопроводов г. Казань при проведении диагностики с различной вероятностью обнаружения дефектов. Показано, что внедрение диагностики с высокой эффективностью обнаружения дефектов позволяет снизить аварийность на 70%, а срок службы трубопроводов увеличить более чем в 3 раза. Проведена технико-экономическая оценка эффективности внедрения диагностики. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Регулярный контроль технического состояния приводит к существенному снижению интенсивности отказов и увеличению срока службы трубопроводов. Экономический эффект при использовании средств диагностики со средней эффективностью составит около 34 млн руб./год, а с высокой – 71 млн руб./год.

Ключевые слова: тепловые сети; надежность трубопроводов; интенсивность отказов; диагностика.

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: Зиганшин Ш.Г., Базукова Э.Р., Гаврилов А.С. Количественная оценка влияния диагностики на надежность трубопроводов тепловых сетей // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2026. Т. 28. № 4. С. 149-156. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-4-149-156.

QUANTITATIVE ASSESSMENT OF THE IMPACT OF DIAGNOSTICS ON THE RELIABILITY OF PIPELINES OF HEATING NETWORKS

Ziganshin S.G., Bazukova E.R., Gavrilo A.S.

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

ziganshin.sg@kgeu.ru

Abstract: The article provides a quantitative assessment of the impact of diagnostics on the reliability of pipelines of heating networks. **RELEVANCE.** The energy and economic efficiency of the entire heat supply system depend on the reliable operation of pipeline networks. However, the impact of diagnostics of heating networks on quantitative indicators of their reliability remains insufficiently studied. **purpose.** **OBJECT.** The aim of the work is to quantify the impact of diagnostic monitoring on the reliability of pipelines of heating networks. **METHODS.** The calculations were performed using an exponential reliability model. Scenario modeling was carried out for pipelines of thermal networks in Kazan, taking into account various levels of diagnostic efficiency. **results.** **RESULTS.** The dependences of the probability of trouble-free

operation and the service life of Kazan pipelines during diagnostics with different probability of detection of defects are obtained. It is shown that the introduction of diagnostics with high efficiency of defect detection can reduce accidents by 70%, and increase the service life of pipelines by more than 3 times. A technical and economic assessment of the effectiveness of the implementation of diagnostics has been carried out. **CONCLUSION.** Regular monitoring of the technical condition leads to a significant reduction in the failure rate and an increase in the service life of pipelines. The economic effect of using diagnostic tools with average efficiency will be about 34 million rubles/year, and with high efficiency – 71 million rubles/year.

Keywords: heating networks; pipeline reliability; failure rate; diagnostics.

Acknowledgments: The work was carried out at the expense of a grant provided by the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan to educational organizations of higher education, 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 perform research.

For citation: Ziganshin S.G., Bazukova E.R., Gavrilov A.S. Quantitative assessment of the impact of diagnostics on the reliability of pipelines of heating networks. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2026; 28 (4): 149-156. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-4-149-156.

Введение (Introduction)

Эффективная работа систем теплоснабжения в значительной степени зависит от надёжности трубопроводов тепловых сетей. Одним из количественных показателей надёжности является вероятность безотказной работы, которая определяется с помощью вероятностно-статистических методов.

Например, в работе [1] статистические подходы применены для анализа надёжности нефтепромысловых трубопроводов в зависимости от их протяженности, а в [2] представлен метод прогнозирования аварийности по ретроспективным данным с использованием методов машинного обучения.

Изучению факторов, влияющих на надёжность тепловых сетей, посвящен ряд исследований [3-7], где показано, что интенсивность отказов трубопроводов зависит от времени и условий эксплуатации. Это связано с процессами старения и накопления повреждений [3,4]. На вероятность безотказной работы большое влияние оказывает коррозийная активность среды, качество теплоизоляции, теплогидравлические режимы, технология прокладки и др. [5-7]. При этом наблюдается резкий рост отказов для трубопроводов старше 20 лет. Для поддержания требуемого уровня надёжности теплоснабжающие организации проводят гидравлические испытания и планово-предупредительные ремонты. Однако для изношенных тепловых сетей с повышенным уровнем аварийности такие методы обеспечения надёжности оказываются недостаточно эффективными [4]. В этих условиях особое значение приобретает внедрение диагностического контроля, позволяющего обнаруживать дефекты на ранней стадии развития и устранять их до возникновения крупной аварии.

Современные методы диагностики трубопроводов условно подразделяются на гидравлические, акустические, магнитные и др. [8,10,11]. Выбор конкретного метода зависит от условий эксплуатации трубопровода и типа диагностируемых дефектов (коррозионные повреждения, трещины, отложения и т.п.).

Вопросы экономической эффективности мероприятий по повышению надёжности рассматриваются в работах [3,8], где показано, что профилактика позволяет существенно снизить эксплуатационные затраты. При этом ущерб от аварийных отказов значительно превышает затраты на профилактические мероприятия.

Целью настоящего исследования является количественная оценка влияния диагностики на показатели надёжности трубопроводов тепловых сетей.

Научная значимость работы заключается в установлении зависимости между вероятностью обнаружения дефектов при диагностике и интенсивностью отказов трубопроводов тепловых сетей. Практическая значимость состоит в возможности использования полученных результатов для обоснования внедрения диагностического контроля на тепловых сетях, позволяющего снизить аварийность и эксплуатационные расходы.

Материалы и методы (Materials and methods)

Надёжность трубопроводов тепловых сетей определяется вероятностью их безотказной работы в течение заданного периода эксплуатации. Для описания отказов трубопроводных систем можно применить экспоненциальную модель надёжности [8,9]:

$$P(t) = e^{-\lambda t} \quad (1)$$

где

$P(t)$ – вероятность безотказной работы трубопровода;

λ – интенсивность отказов;

t – время эксплуатации.

Интенсивность отказов определяется на основе статистических данных эксплуатации трубопроводов:

$$\lambda = \frac{N}{L \cdot T} \quad (2)$$

где

N – число аварий;

L – протяженность трубопроводов;

T – период наблюдения.

Профилактические мероприятия, в число которых входит диагностика, приводят к снижению интенсивности отказов. Значение интенсивности отказов при использовании диагностики можно записать как:

$$\lambda_d = \lambda(1 - P_d) \quad (3)$$

где P_d — вероятность обнаружения дефекта.

Тогда вероятность безотказной работы трубопровода при использовании диагностики можно записать как:

$$P_d(t) = e^{-\lambda_d t} \quad (4)$$

Зададим критический уровень вероятности безотказной работы, выше которого трубопровод будет считаться работоспособным. По данным эксплуатации тепловых сетей крупных городов РФ, интенсивность отказов лежит в диапазоне значений $\lambda = 0,01 \div 2,5$ отказов/(км·год) [12]. Причем согласно приказу Минрегиона России №310 от 26.07.2013, системы теплоснабжения с $\lambda \geq 1,2$ относятся к категории ненадежных. В этих условиях расчетная вероятность безотказной работы $P(t)$ может принимать значения 0,2 и ниже. В связи с этим, для тепловых сетей примем $P_{кр} = 0,2$, соответствующий предельному состоянию эксплуатации.

Тогда срок службы определяется моментом времени, при котором

$$P(t) = P_{кр} = e^{-\lambda t} \quad (5)$$

Отсюда срок службы определяется по формуле:

$$t = -\frac{\ln(P_{кр})}{\lambda} \quad (6)$$

Результаты и обсуждение (Results and discussions)

Количественную оценку влияния диагностики на надежность проведем на примере тепловых сетей города Казань. В таблице 1 представлена их структура и протяженность.

Таблица 1

Table 1

Динамика протяженности и структуры тепловых сетей

Dynamics of the length and structure of heating networks

Год	Сети ГВС, км	Квартальные сети, км	Магистральные сети, км	Общая протяженность тепловых сетей, км
2007	260	630	300	1180
2008	260	640	310	1200
2009	260	650	310	1210
2010	260	660	310	1240
2011	260	670	320	1260
2012	260	680	320	1270
2013	260	690	320	1280
2014	260	700	320	1300
2015	260	720	320	1320
2016	260	760	330	1350
2017	260	780	330	1370
2018	260	900	300	1200
2019	260	920	300	1200
2020	260	940	300	1200

*Источник: Составлено автором (Source: Compiled by the author)

Данные по повреждениям трубопроводов тепловых сетей за период 2007–2020 гг. представлены в таблице 2.

Таблица 2

Table 2

Статистика повреждений трубопроводов (2007–2020 гг.)

Pipeline damage statistics (2007-2020)

Год	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
N	933	868	891	792	960	1082	1115	1032	1144	1246	1145	775	634	450

*Источник: Составлено автором (Source: Compiled by the author)

Таким образом, за период $T=14$ лет суммарное количество повреждений составило $N_{\Sigma}=13050$.

Определим интенсивность отказов:

$$\lambda = \frac{13050}{1200 \cdot 14} = 0,78 \text{ отказов/}(км \cdot \text{год})$$

Это значение позволяет отнести данную тепловую сеть к категории малонадежных. Проведем сценарное моделирование влияния диагностики на показатели надежности.

Эффективность диагностики будет зависеть от вероятности обнаружения дефектов P_d . Анализ литературы показывает, что для корреляционных акустических методов значения P_d можно приближенно принять в диапазоне $0,3 \div 0,5$, для методов тепловизионного контроля $P_d = 0,5 \div 0,75$, в ультразвуковых дефектоскопах P_d могут достигать значений $0,85$ [13-15]. В ряде научных исследований заявляются высокие значения достоверности распознавания дефектов, достигающие $90 - 95 \%$ [16]. Однако эти показатели, как правило, получены на ограниченных выборках данных или в лабораторных условиях. Они характеризуют скорее качество классификации сигналов, а не вероятность обнаружения дефектов P_d . Как показывает практика, при переходе к реальным тепловым сетям эффективность будет ниже вследствие влияния помех, неоднородности среды и других ограничений. Исходя из этого, для моделирования рассмотрим следующие значения вероятности обнаружения дефектов P_d : $0; 0,3; 0,5; 0,7$ (табл. 3).

Таблица 3

Table 3

Влияние вероятности обнаружения утечки на интенсивность отказов

The effect of leak detection probability on failure rate

Эффективность диагностики	Вероятность обнаружения P_d	Интенсивность отказов λ_d , отказов/(км·год)
без диагностики	0	0.78
низкая	0.3	0.546
средняя	0.5	0.39
высокая	0.7	0.234

*Источник: Составлено автором (Source: Compiled by the author)

Из таблицы 3 видно, что при внедрении диагностики с высокой эффективностью, аварийность снизится на 70% .

Вероятность безотказной работы трубопровода зависит от продолжительности его эксплуатации (таблица 4).

Таблица 4

Table 4

Вероятность безотказной работы при разной продолжительности эксплуатации трубопровода

The probability of trouble-free operation with different duration of pipeline operation

T (год)	Вероятность обнаружения P_d			
	0 (без диагностики)	0.3 (низкая)	0.5 (средняя)	0.7 (высокая)
0	1	1	1	1
1	0.458	0.579	0.677	0.791
5	0.02	0.065	0.142	0.31
10	0.0004	0.004	0.02	0.096

*Источник: Составлено автором (Source: Compiled by the author)

Результаты расчётов показывают, что через 10 лет даже при высокой вероятности обнаружения дефектов $P_d = 0,7$ вероятность безотказной работы достигнет значения $P(t) = 0,096$. Из этого можно сделать вывод, что диагностика должна быть важной, но не единственной частью стратегии повышения надёжности (плановая замена трубопроводов,

оптимизация режимов эксплуатации, контроль качества теплоносителя, внедрение систем мониторинга и т.п.).

В таблице 5 и на рисунке 1 приведены результаты расчет срока службы трубопроводов при разной эффективности диагностики.

Таблица 5
Table 5

Изменение срока службы трубопроводов
Changing the service life of pipelines

Вероятность обнаружения P_d	Интенсивность отказов	Срок службы, год
$P_d = 0$ (без диагностики)	0.78	2.06
$P_d = 0.3$	0.546	2.95
$P_d = 0.5$	0.39	4.13
$P_d = 0.7$	0.234	6.88

*Источник: Составлено автором (Source: Compiled by the author)

Из таблицы 5 и рисунка 1 видно, что без диагностики срок службы трубопроводов составляет около 2 лет, а применение диагностики с вероятностью обнаружения дефектов $P_d = 0,7$ увеличивает данный показатель почти до 7 лет (более чем в 3 раза).

Экономический эффект от внедрения диагностики можно определить как разницу между экономией на предотвращенных авариях и затратами на проведение диагностических мероприятий:

$$\Xi = \Xi_a - \Xi_d \quad (7)$$

где

Ξ_a – экономия на предотвращенных авариях, руб/год,

Ξ_d – затраты на диагностику, руб/год.

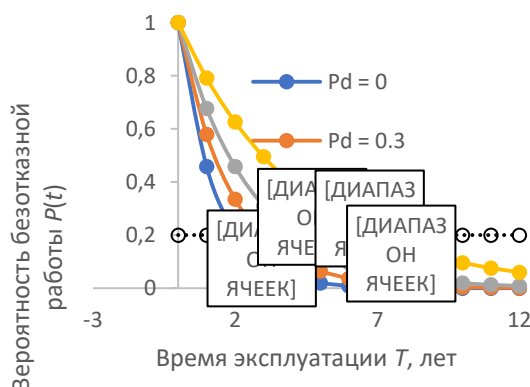


Рис. 1. Надежность и срок службы трубопроводов с учетом диагностики Fig. 1. Reliability and service life of pipelines taking into account diagnostics

*Источник: Составлено автором (Source: Compiled by the author)

Экономия на предотвращенных авариях Ξ_a можно найти как:

$$\Xi_a = \Delta N \cdot C_a \quad (8)$$

где

C_a – средняя стоимость ремонтных работ одной аварии, принята равной 200 тыс. руб.;

ΔN – количество предотвращенных аварий за счет внедрения диагностики.

Значение ΔN можно найти по формуле:

$$\Delta N = (\lambda_0 - \lambda_d) \cdot L \quad (9)$$

где

L – длина сети, км;

λ_0 – интенсивность отказов до применения диагностики;

λ_d – интенсивность отказов после применения диагностики.

Затраты на диагностику Ξ_d определим как:

$$\Xi_d = C_d \cdot L \quad (10)$$

где

C_d – себестоимость диагностики одного километра сети в год, принимаем равной 50 тыс. руб/км.

В таблице 6 сведены результаты расчета экономического эффекта от внедрения диагностики.

Таблица 6

Table 6

Экономический эффект от внедрения диагностики

The economic effect of the introduction of diagnostics

Эффективность диагностики	P_d	λ_d	ΔN	Δ_a , млн руб.	Δ_d , млн руб.	Δ , млн руб.
Без диагностики	0	0.78	0	0	0	0
Низкая эффективность	0.3	0.546	281	56.2	60	-3.8
Средняя эффективность	0.5	0.39	468	93.6	60	33.6
Высокая эффективность	0.7	0.234	655	131	60	71

*Источник: Составлено автором (Source: Compiled by the author)

Заклучение (Conclusions)

Полученные результаты показывают, что при фактической интенсивности отказов тепловой сети $\lambda = 0,78$ отказов/(км·год) надежность системы теплоснабжения города находится на низком уровне и относится к категории малонадежных. Традиционные меры обеспечения надежности (аварийный ремонт, плановая замена отдельных участков) не обеспечивают устойчивого снижения аварийности.

Проведённое сценарное моделирование влияния диагностики на показатели надежности показало, что регулярный контроль технического состояния приводит к существенному снижению интенсивности отказов (до $\lambda = 0,234$ отказов/(км·год)) за счёт раннего выявления и устранения дефектов. Это приводит к увеличению вероятности безотказной работы и росту расчетного срока службы трубопроводов в 2–3 раза.

Результаты технико-экономической оценки подтверждают эффективность внедрения диагностики. Расчеты показали, что при использовании средств диагностики со средней эффективностью экономия составляет около 34 млн руб./год, а с высокой – 71 млн руб./год.

Литература

1. Острейковский В.А., Силин Я.В. Статистический анализ надежности нефтепромысловых трубопроводов // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. 2008. № 1. С. 14.
2. Садыков А.Ф., Мухаметзянов Б.И., Черняк М.В., и др. Разработка и применение инструмента прогнозирования остаточного ресурса трубопроводов с использованием методов машинного обучения // ПРОНЕФТЬ. Профессионально о нефти. 2025. Т. 10. № 2. С. 132–143. doi: 10.51890/2587-7399-2025-10-2-132-143.
3. Зайцев В.А., Галицкий В.В., Гашо Е.Г. Повышение надежности теплоснабжения как инструмент энергоэффективности при эксплуатации тепловой сети // Безопасность в техносфере. 2012. № 6. С. 52–56.
4. Москалев И.Л., Литвак В.В. Повреждаемость основных узлов сетей теплоснабжения городов Российской Федерации // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2015. Т. 326. № 7. С. 70–80.
5. Ахметова И.Г., Ахметов Т.Р. Анализ дополнительных факторов при определении интенсивности отказов трубопроводов тепловых сетей // Теплоэнергетика. 2019. № 10. С. 50–56. doi: 10.1134/S0040363619100011.
6. Ахметова И.Г., Сабирзанов А.Я., Нурисламова А.Р., Ахметов Д.Т. Совершенствование системы централизованного теплоснабжения: анализ и предложения по повышению надежности // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2025. Т. 17. № 1 (65). С. 71–79.
7. Гумеров И.К., Шмаков В.А., Галяутдинов А.А., Рябов И.А. Проблемы оценки остаточного ресурса и безопасности магистральных трубопроводов // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2006. № 66. С. 140–156.
8. Гридин С.В., Бирюков А.Б. Анализ методов диагностирования трубопроводов тепловых сетей для определения их фактического технического состояния // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. 2024. № 2. С. 69–79. doi: 10.5281/zenodo.12548579.

9. Труханов В.М. Надежность технических систем типа подвижных установок на этапе проектирования и испытания опытных образцов. М.: Машиностроение, 2003. 320 с.

10. Политова Т.О., Загретдинов А.Р., Сидоров М.В., Зиганшин Ш.Г., Ваньков Ю.В. Методы машинного обучения в разработке методики обнаружения утечек. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025;27(2):177-186. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2025-27-2-177-186>.

11. Zagretidinov A., Ziganshin Sh., Vankov Yu., et al. Determination of Pipeline Leaks Based on the Analysis the Hurst Exponent of Acoustic Signals // Water. 2022. Vol. 14. No. 19. P. 3190. doi: 10.3390/w14193190.

12. Миргородский А.И. Отчет о состоянии систем теплоснабжения крупнейших городов в 2024 году [Электронный ресурс]. Москва: Союз организаций по наладке теплоэнергетического оборудования и сетей (Союз ТеплоНаладка), 2026. URL: <https://heatunion.ru/wp-content/uploads/2026/01/Сравнение-систем-теплоснабжения-по-индикаторам-развития.pdf> (дата обращения: 15.04.2026).

13. О возможностях диагностики трубопроводов тепловых сетей // Новости теплоснабжения. 2024. № 3 (236).

14. Zaman D., Tiwari M.K., Gupta A.K., Sen D. A review of leakage detection strategies for pressurised pipeline in steady-state // Engineering Failure Analysis. 2020. Vol. 109. Art. 104264. doi: 10.1016/j.engfailanal.2019.104264.

15. Korlapati N.V.S., Khan F., Noor Q., Mirza S., Vaddiraju S. Review and analysis of pipeline leak detection methods // Journal of Pipeline Science and Engineering. 2022. Vol. 2. Iss. 4. doi: 10.1016/j.jpse.2022.100074.

16. Li J., Zeng F., Xie J., et al. A review of damage mechanisms, prediction methods, and risk management strategies for urban underground steel pipelines // Results in Engineering. 2026. Vol. 29. Art. 109701. doi: 10.1016/j.rineng.2026.109701.

Авторы публикации

Зиганшин Шамиль Гаязович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения» Казанского государственного энергетического университета. Email: ziganshin.sg@kgeu.ru.

Базукова Эльвира Раисовна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения» Казанского государственного энергетического университета. Email: ell17@mail.ru.

Гаврилов Артем Степанович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения» Казанского государственного энергетического университета. Email: artemchik-@mail.ru.

References

1. Ostreykovskiy VA, Silin YaV. Statisticheskii analiz nadezhnosti neftepromyslovykh truboprovodov. Oil and Gas Business. 2008;(1):14. (In Russ).

2. Sadykov AF, Mukhametzyanov BI, Chernyak MV, et al. Razrabotka i primeneniye instrumenta prognozirovaniya ostatochnogo resursa truboprovodov s ispolzovaniyem metodov mashinnogo obucheniya. PROneft. Professionally about Oil. 2025;10(2):132-143. (In Russ). doi: 10.51890/2587-7399-2025-10-2-132-143.

3. Zaytsev VA, Galitskiy VV, Gasho EG. Povysheniye nadezhnosti teplosnabzheniya kak instrument energoeffektivnosti pri ekspluatatsii teplovoy seti. Safety in Technosphere. 2012;(6):52-56. (In Russ).

4. Moskalev IL, Litvak VV. Povrezhdayemost osnovnykh uzlov setey teplosnabzheniya gorodov Rossiyskoy Federatsii. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. 2015;326(7):70-80. (In Russ).

5. Akhmetova IG, Akhmetov TR. Analiz dopolnitelnykh faktorov pri opredelenii intensivnosti otkazov truboprovodov teplovykh setey. Thermal Engineering. 2019;(10):50-56. (In Russ). doi: 10.1134/S0040363619100011.

6. Akhmetova I.G., Sabirzanov A.Ya., Nurislamova A.R., Akhmetov D.T. Improving the district heating system: analysis and proposals to increase reliability. KAZAN STATE POWER ENGINEERING UNIVERSITY BULLETIN. 2025. Vol. 17. No. 1 (65). P. 71-79.

7. Gumerov IK, Shmakov VA, Galyautdinov AA, Ryabov IA. Problemy otsenki ostatochnogo resursa i bezopasnosti magistralnykh truboprovodov. Problems of Gathering, Treatment and Transportation of Oil and Oil Products. 2006;(66):140-156. (In Russ).
8. Gridin SV, Biryukov AB. Analiz metodov diagnostirovaniya truboprovodov teplovykh setey dlya opredeleniya ikh fakticheskogo tekhnicheskogo sostoyaniya. Bulletin of Donetsk National University. Series G: Technical Sciences. 2024;(2):69-79. (In Russ). doi: 10.5281/zenodo.12548579.
9. Trukhanov VM. Nadezhnost tekhnicheskikh sistem tipa podvizhnykh ustanovok na etape proyektirovaniya i ispytaniya opytnykh obraztsov. Moscow: Mashinostroyeniye; 2003. (In Russ).
10. Politova T.O., Zagretidinov A.R., Sidorov M.V., Ziganshin Sh.G., Vankov Yu.V. Machine learning methods in the development of leak detection techniques. Power engineering: research, equipment, technology. 2025;27(2):177-186. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2025-27-2-177-186>.
11. Zagretidinov A, Ziganshin Sh, Vankov Yu, et al. Determination of Pipeline Leaks Based on the Analysis the Hurst Exponent of Acoustic Signals. Water. 2022;14(19):3190. doi: 10.3390/w14193190.
12. Mirgorodskiy AI. Otchet o sostoyanii sistem teplosnabzheniya krupneyshikh gorodov v 2024 godu [Electronic resource]. Moscow: Soyuz organizatsiy po naladke teploenergeticheskogo oborudovaniya i setey (Soyuz TeploNaladka); 2026. Available at: <https://heatunion.ru/wp-content/uploads/2026/01/Сравнение-систем-теплоснабжения-по-индикаторам-развития.pdf>. Accessed: 15 Apr 2026. (In Russ).
13. O vozmozhnostyakh diagnostiki truboprovodov teplovykh setey. Novosti teplosnabzheniya. 2024;(236). (In Russ).
14. Zaman D, Tiwari MK, Gupta AK, Sen D. A review of leakage detection strategies for pressurised pipeline in steady-state. Engineering Failure Analysis. 2020;109:104264. doi: 10.1016/j.engfailanal.2019.104264.
15. Korlapati NVS, Khan F, Noor Q, Mirza S, Vaddiraju S. Review and analysis of pipeline leak detection methods. Journal of Pipeline Science and Engineering. 2022;2(4). doi: 10.1016/j.jpse.2022.100074.
16. Li J, Zeng F, Xie J, et al. A review of damage mechanisms, prediction methods, and risk management strategies for urban underground steel pipelines. Results in Engineering. 2026;29:109701. doi: 10.1016/j.rineng.2026.109701.

Authors of the publication

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

Elvira R. Bazukova – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. Email: ell17@mail.ru

Artem S. Gavrilov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. Email: artemchik-@mail.ru

Шифр научной специальности: 2.4.5 – Энергетические системы и комплексы

Получено 05.05.2026 г.

Отредактировано 26.05.2026 г.

Принято 28.05.2026 г.