

ВЫЯВЛЕНИЕ ПОТЕРЬ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В СИСТЕМАХ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

В. Ю. Грохотов, А. Г. Михайлов, И. А. Степашкин

Омский государственный технический университет,
Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11

Системы централизованного теплоснабжения выполняют важную социально-энергетическую роль, в которой утечки теплоносителя, вызванные естественным износом тепловых сетей и оборудования, являются основной проблемой, влияющей на безопасность и надежность её функционирования. В статье представлена актуальная информация о состоянии системы теплоснабжения, рассмотрены основные направления развития методов локализации мест утечек, возможность их использования с учётом региональных особенностей, а также представлены опытные данные их применения на историческом архиве выявленных ранее проблем.

Ключевые слова: системы теплоснабжения, утечка теплоносителя, тепловые сети, методы обнаружения утечек, сети трубопроводов, цифровизация теплоснабжения, анализ данных приборов учета, аварийность теплосетей.

Введение

Российская Федерация территориально расположена в трех климатических зонах: умеренной, арктической, субарктической со среднегодовой температурой $-5,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, средняя продолжительность отопительного периода 213 суток, в связи с чем обеспечение надежности теплоснабжения является приоритетной задачей.

По данным отчета Минэнерго России за 2022 год о состоянии теплоэнергетики и централизованного теплоснабжения в Российской Федерации за период с 2015 по 2022 год потери на тепловых сетях выросли на 13,1 %, максимальные значения достигались в 2021 году, рост по отношению к 2015 году составил 21,4 % (132,7 млн Гкал). Представленные значения не соответствуют целевым показателям Комплексного плана — 9,4 %, характеризуются устойчивым положительным ростом.

Одним из основных факторов, определяющих величину потерь, является физический износ тепловых сетей. Значительный объем которых — до 80,5 % составляют сети диаметром до 200 мм, имеющие наибольшие удельные потери. Данная группа тепловых сетей также имеет наибольшую повреждаемость, что свидетельствует о высоком износе квартальных тепловых сетей. Напротив, повреждаемость магистральных тепловых сетей диаметром более 600 мм — наименьшая, что свидетельствует об их удовлетворительном состоянии [1].

Значительный износ тепловых сетей приводит к возникновению аварийных ситуаций, остановкам теплоснабжения. Средний рост числа аварий за период с 2018 по 2022 год в системе теплоснабжения 10-ти наиболее аварийных регионов составил 287 % [2]. По данным Росстата за 2022 год уровень износа трети тепловых сетей превышает критические отметки. При этом недофинансирование мероприятий по замене тепловых сетей достигает 60–70 % [1].

За 2022 год аварийные ситуации привели к прекращению теплоснабжения 1327 тыс. чел. В 2023 го-

ду остановки теплоснабжения зафиксированы в Новосибирске — 500 домов, в Санкт-Петербурге — 642 объекта, Подольске — 40 тыс. жителей, Саратове — 28 тыс. жителей [2].

Основные причины — порывы трубопроводов, повреждения оборудования и тепловых сетей, износ оборудования, длительное устранение обнаруженных дефектов на тепловых сетях.

Среднее время ликвидации аварии в 2021 году составляло 9 ч. 29 мин., в 2022 году — 11 ч. 13 мин. Увеличение времени устранения повреждений составило +18,3 % [1].

Решение задачи снижения аварийности носит комплексный характер. С целью достижения целевых показателей Комплексного плана необходимо совместное применение мер как финансового характера: партнерство с бизнесом, долгосрочная тарифная политика, так и технического: развитие систем прогнозирования, современных методов диагностики и ремонтов, цифровизация системы теплоснабжения.

Останов теплоснабжения, особенно в отопительный период, является наиболее опасным последствием неисправностей в работе системы. С целью недопущения критических ситуаций, требующих оперативных и значительных материальных, человеческих и финансовых ресурсов, необходимо внедрять методы раннего обнаружения незначительных, незаметных повреждений тепловых сетей, которые изначально приводят к увеличению потерь тепловой энергии, теплоносителя, и в дальнейшем, при влиянии ряда факторов, могут привести к авариям.

В г. Омске система теплоснабжения функционально разделена между разными юридическими лицами: производство тепловой энергии и транспортировку её по магистральным тепловым сетям осуществляет АО «ТГК-11», АО «Омск РТС», транспорт тепла до потребителей по распределительным (квартальным) тепловым сетям — АО «Тепловая компания». Проектный температурный график задан $150/70\text{ }^{\circ}\text{C}$, однако в связи с фактическим сни-

жением данных параметров до 116–122 °С, для обеспечения требуемого количества тепла увеличен объем циркуляции теплоносителя в системе, площадь теплообменных аппаратов [3].

Принимая во внимание ранее представленную статистику Минэнерго о степени повреждаемости квартальных тепловых сетей, структурную организацию системы теплоснабжения, увеличенный расход теплоносителя, отсутствие приборов учёта на границах раздела тепловых сетей, преимущественно подземную прокладку трубопроводов развитие систем предиктивной аналитики, использование систем цифровизации является необходимым условием развития и обеспечения надежности системы теплоснабжения.

Развитие систем определения повреждений трубопроводов

Системы и методы поиска повреждений трубопроводов широко представлены в научном сообществе развитых и развивающихся стран мира: КНР, США, Германия, Канада, Бразилия, Италия, Англия. Более 1000 научных статей в базах данных научных изданий опубликовано на данную тему с ключевыми словами «обнаружение утечек в трубопроводах». Наиболее активный рост числа исследований в области поиска повреждений приходится на второе десятилетие XXI века, что обусловлено развитием технологий обработки больших массивов данных, машинного обучения. В первых работах, в 60-е годы XX века, изучалось изменение напряжений в стенках ламинарного потока, а также его средней скорости.

С развитием технологий разрабатывается методология LLP (localize, locate, pinpoint). Локализация — определение участка сети, обнаружение — выявление места утечки, точное определение — указание места радиусом 20 см. В дальнейшем методология уточняется, добавлением фазы идентификации (Identify) — определение существования повреждения и фильтрацией ложных сигналов.

Используется специальное оборудование — чувствительные сенсоры, гидрофоны, теческатели. Разрабатываются методы, использующие незначительные изменения параметров для фиксации повреждений: звук, вибрации, температура, применяются специальные добавки-сигнализаторы к теплоносителю (трассирующие газы), исследуются данные электромагнитных волн, в трубопроводы вводятся специальные высокочувствительные элементы (smart ball).

Наиболее важным этапом при поиске утечек является определение наличия повреждений. Развитие систем анализа больших объемов данных (Big Data), внедрение технологий машинного обучения оказали значительное влияние на вектор развития данной области [4].

Постановка задачи

В настоящее время значительное число работ связано с созданием сложных математических моделей и алгоритмов, обрабатывающих информацию [5–8]. Созданные системы имитируют работу сетей трубопроводов, обрабатывают значительный объем исторических данных при аварийной и штатной работе системы. Обученная модель, на основании измеряемых параметров, определяет места повреждений трубопроводов с заданной точностью [4].

Представленные актуальные методы обнаружения повреждений трубопроводов, несмотря на значительную заявленную авторами точность, — более 90 %, имеют ряд значительных ограничений: высокая стоимость реализации нейронных систем и систем машинного обучения, исключительная требовательность к профессиональным компетенциям специалистов, наличие архива исторических данных для обучения системы, строгие ограничения к топологии системы трубопроводов.

Исходя из изложенного, требуется разработка способа выявления повреждений трубопроводов тепловых сетей в условиях ограниченного финансирования с использованием имеющихся ресурсов.

Теория

В соответствии с законодательством РФ установка приборов учёта конечными потребителями тепловой энергии является в рамках требований Статьи 13 Федерального закона об энергосбережении обязательным мероприятием. Согласно Государственному докладу [9], уровень оснащённости приборами учёта тепла составляет 66,2 %.

Концепцией технологического развития РФ до 2030 года предусмотрено внедрение систем цифровизации, в том числе в области жилищно-коммунального хозяйства. Современные средства измерения узлов учёта тепловой энергии оборудуются системами диспетчеризации, позволяющими осуществлять дистанционный сбор сведений о параметрах и расходах теплоносителя в системах теплоснабжения.

Таким образом, учитывая значительный уровень приборности конечных потребителей, наличие систем диспетчеризации, анализ изменений показателей средств измерения узлов учёта для обнаружения повреждений трубопроводов тепловых сетей является оптимальным решением данной задачи.

Методика определения повреждений на основе анализа показаний узлов учёта конечных потребителей тепловой энергии представлена в работе [10]. По результатам исследований расчетных зависимостей и анализа режима работы тепловых сетей определены безразмерные параметры:

$$B_{yч}^{1-2} = \frac{t_1^1 - t_1^2}{\frac{t_1^1 + t_1^2}{2} - t_n} \quad \text{— расходная характеристика}$$

участка трубопровода, где t_1^1, t_1^2 — температура теплоносителя в подающем трубопроводе в узлах 1 и 2, °С; t_n — фактическая температура наружного воздуха, °С;

$$kF_{зг} = \frac{Q_0^{\max}}{\frac{t_1 + t_2}{2} - t_n} \quad \text{— тепловая характеристика}$$

здания, которая определяется как сумма произведений коэффициентов теплопередачи отдельных ограждающих конструкций здания $kF_{зг} = \sum k_i F_i$, где Q_0^{\max} — максимальная отопительная нагрузка, Гкал/ч, t_1^1, t_1^2 — расчетные температуры теплоносителя в прямом и обратном трубопроводе, °С, которые в установившихся режимах штатной работы системы теплоснабжения остаются постоянными.

Безразмерный параметр $kF_{зг}$ характеризует теплофизические свойства объекта, его конструктивные элементы, $B_{yч}$ — режим работы тепловых сетей. Влияние параметра $kF_{зг}$ на расходную характеристику участка трубопровода подробно рассмотрено в работе [10].

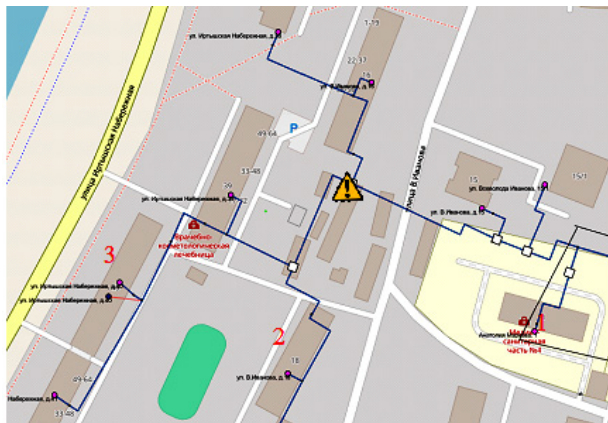


Рис. 1. Схема участка тепловой сети
Fig. 1. Scheme of the heat network section

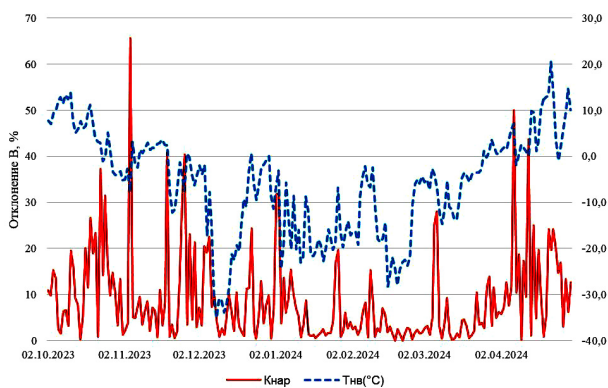


Рис. 2. Изменение расходной характеристики участка тепловой сети объектов 1 и 2
Fig. 2. Changes of flow characteristics of the heat network section of the 1 and 2 objects

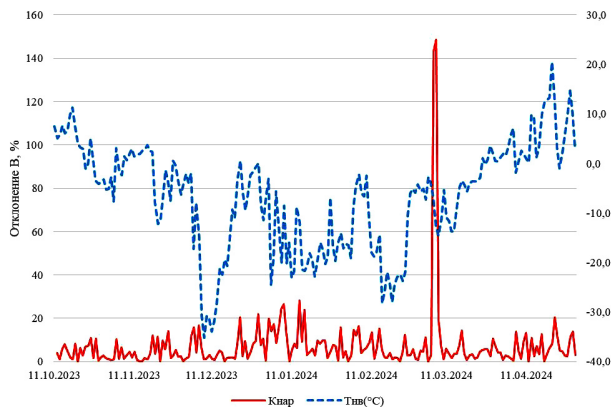


Рис. 3. Изменение расходной характеристики участка тепловой сети объектов 2 и 3
Fig. 3. Changes of flow characteristics of the heat network section of the 2 and 3 objects

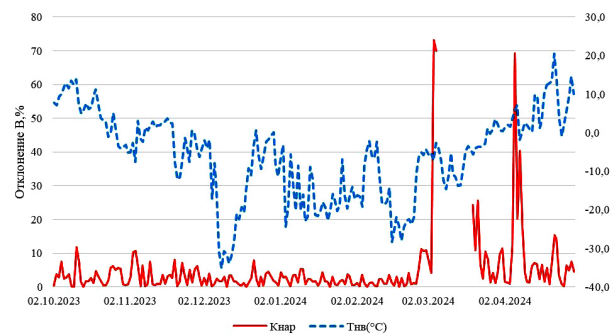


Рис. 4. Изменение расходной характеристики участка тепловой сети объектов Волгоградская 4/А и Волгоградская 4/В
Fig. 4. Changes of flow characteristics of the heat network section of the Volgogradskaya 4/A and Volgogradskaya 4/B objects

В случае возникновения повреждений, переходных процессов, изменения физических характеристик трубопроводов и потребителей, данные параметры могут варьироваться, при этом, по результатам анализа, их изменение может осуществляться независимо друг от друга.

Представленные безразмерные параметры предложено использовать на специально выбранных участках, расположенных между узлами учёта конечных потребителей.

Предложенный в работе пример экспериментального подтверждения свидетельствует о возможности применения данной методики для локализации мест повреждения трубопроводов тепловой сети.

Обсуждение результатов

Рассмотренная выше методика определения повреждений в тепловых сетях теплоснабжения на основании показаний приборов учёта, в связи с простотой её реализации, применена на историческом архиве ранее зафиксированных наиболее крупных повреждениях тепловых сетей в г. Омске.

Повреждение участка тепловой сети вблизи жилого дома № 16 по ул. В. Иванова (отмечено на рис. 1). Приборы учёта установлены на объектах по ул. Маркова, д. 1 (объект № 1), ул. В. Иванова, д. 18 (объект № 2) и ул. Иргышская набережная, д. 40 (объект № 3). Анализируемый интервал показаний приборов учёта — отопительный период 2023/24 года.

С целью определения повреждения применяется относительное изменение безразмерных параметров, выраженное в процентах. Таким образом, используем относительную величину абсолютного изменения параметра $B_{уч}^{i-2}$ между i -ми и $(i+1)$ -ми сутками, приведенную к среднему значению величин этих параметров:

$$K_{нар} = \left| \frac{B_{i+1} - B_i}{\frac{B_{i+1} + B_i}{2}} \right| \cdot 100 \% \quad (1)$$

На рис. 2 представлена диаграмма изменения величины коэффициента $K_{нар}$, определенного по формуле (1) объектов 1 и 2. На дополнительной оси отображено изменение температуры наружного воздуха.

По результатам анализа графика (рис. 2) предположительно 04.11.2023 года возник переходный процесс. Показатель $K_{нар}$ превысил 60 %. По имеющимся архивным данным о выявленных повреждениях в период с ноября по декабрь 2023 года фиксировалась утечка теплоносителя, повреждение трубопровода. При положительных температурах применение метода не обеспечивает результата, в связи с отсутствием зависимости температуры в подающем трубопроводе от температуры наружного воздуха (обеспечение минимальной температуры для нужд горячего водоснабжения).

Одновременно с этим, рассматривая аналогичный расчет для группы объектов 2 и 3, где нарушение в повреждении трубопроводов в этот период не зафиксировано, отклонение расходной характеристики участка в среднем не превышает 20 % (рис. 3).

В экстремуме на 07.03.2024 года в АО «Омск РТС» поступила информация об утечке теплоносителя, акт от 06.03.2024 года № МО-121 о поступлении воды в камеру со стороны жилого дома.

Подобный анализ проведен также в отношении других групп объектов, где случаи изменения безразмерных параметров соответствовали зарегистрированным случаям повреждений трубопроводов (рис. 4).

Вывод и заключение

Исходя из полученных данных, рассмотренная методика удовлетворяет требованиям поставленной задачи — обнаружение повреждений в тепловых сетях систем теплоснабжения аналитическим способом без привлечения дополнительных ресурсов.

Следует отметить, выборка объектов для анализа осуществлялась исходя из уже имеющегося архива повреждений трубопроводов систем теплоснабжения.

Для полной оценки достоверности полученных результатов исследования необходимо провести верификацию методики на большем объеме ежедневно поступающей информации о показаниях приборов учета и, в случае выявления аномалий, контрольного выезда на объект для подтверждения наличия повреждений трубопроводов с использованием специального оборудования — течеискателя, проверки ближайших тепловых камер.

С целью автоматизации процессов, в настоящее время в АО «Омск РТС» осуществляется подключение приборов учёта, установленных у абонентов, к единой системе диспетчеризации на базе АИИС «Элдис», создание групп связанных объектов, наладка расчетной модели, осуществляющей ежедневный анализ параметров и направляющей рекомендации специалистам по предполагаемым местам повреждений.

Организация системы локализации мест повреждений по предложенной методике в г. Омске в настоящее время имеет ряд ограничений, связанных с низким уровнем оснащения конечных потребителей приборами учёта тепловой энергии, сложной системой организации сети трубопроводов — радиально-кольцевая схема с перетоками и обводными линиями.

Также необходимо отметить существующую невозможность использования данной методики в межотопительный, переходный осенне-весенний период, необходимость подбора для каждой пары объектов индивидуального порогового значения изменения параметра $K_{нар}$.

Список источников

1. Отчет о состоянии теплотехники и централизованного теплоснабжения в Российской Федерации в 2022 году // Минэнерго России. Москва, 2023. 161 с.

2. Почти треть теплосетей в России нуждается в замене // RTVI. URL: <https://rtvi.com/news/pochti-tret-teplosetej-v-rossii-nuzhdaetsya-v-zamene/> (дата обращения: 17.01.2025).

3. Дмитриев В. З. Системы централизованного теплоснабжения города Омска и пути их совершенствования // Национальные приоритеты России. 2019. № 4. С. 42–47. EDN: TQVEAQ.

4. El-Zahab S., Zayed T. Leak detection in water distribution networks: an introductory overview // Smart Water. 2019. Vol. 4 (1). DOI: 10.1186/s40713-019-0017-x.

5. Shen Y., Chen J., Fu Q. [et al.]. Detection of district heating pipe network leakage fault using UCB arm selection method // Buildings. 2021. Vol. 11 (7). 275. DOI: 10.3390/buildings11070275.

6. Örn Garðarsson G., Boem F., Toni L. Graph-Based Learning for Leak Detection and Localisation in Water Distribution Networks* // IFAC-PapersOnLine. 2022. Vol. 55 (6). P. 661–666. DOI: 10.1016/j.ifacol.2022.07.203.

7. Zhou S., Liu C., Zhao Y. Leakage diagnosis of heating pipe-network based on BP neural network // Sustainable Energy, Grids and Networks. 2022. Vol. 32. DOI: 10.1016/j.segan.2022.100869. EDN: FJKAZY.

8. van der Walt J. C., Heyns P. S., Wilke D. N. Pipe network leak detection: comparison between statistical and machine learning techniques // Urban Water Journal. 2018. Vol. 15 (10). DOI: 10.1080/1573062X.2019.1597375.

9. Государственный доклад о состоянии энергосбережения и повышении энергетической эффективности в Российской Федерации за 2022 год // Министерство экономического развития Российской Федерации. URL: https://www.economy.gov.ru/material/file/b2ec92f00344707af95c8d44a6abbde8/Energy_efficiency_2023pdf (дата обращения: 12.11.2024).

10. Косяков С. И., Садыков А. М., Сенников В. В., Тихонов А. И. Метод локализации мест утечек в тепловых сетях на основе анализа данных узлов учета потребителей тепловой энергии // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2021. № 6. С. 70–78. DOI: 10.17588/2072-2672.2021.6.070-078. EDN: IREILE.

ГРОХОТОВ Валерий Юрьевич, аспирант, старший преподаватель кафедры «Теплоэнергетика» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.

SPIN-код: 9419-6170

ResearcherID: MСJ-1928-2025

Адрес для переписки: 19valera94@mail.ru

МИХАЙЛОВ Андрей Гаррьевич, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Теплоэнергетика» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 7337-8036

AuthorID (РИНЦ): 385534

AuthorID (SCOPUS): 56503044200

СТЕПАШКИН Иван Александрович, старший преподаватель кафедры «Теплоэнергетика» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 3166-3378

AuthorID (РИНЦ): 948077

AuthorID (SCOPUS): 57214754518

Для цитирования

Грохотов В. Ю., Михайлов А. Г., Степашкин И. А. Выявление потерь теплоносителя в системах централизованного теплоснабжения // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2025. Т. 9, № 1. С. 32–36. DOI: 10.25206/2588-0373-2025-9-1-32-36. EDN: YIUZGT.

Статья поступила в редакцию 20.01.2025 г.

© В. Ю. Грохотов, А. Г. Михайлов, И. А. Степашкин

DETECTION OF HEAT CARRIER LOSSES IN CENTRALIZED HEATING SYSTEMS

V. Yu Grokhotov, A. G. Mikhailov, I. A. Stepashkin

Omsk State Technical University,
Russia, Omsk, Mira Ave., 11, 644050

Centralized heating systems are widely used for providing heat to residential, commercial, and industrial buildings. However, one of the significant challenges in these systems is the loss of heat carrier (usually water or steam), which can lead to inefficiencies, increased operational costs, and environmental impacts. Detecting and addressing these losses is crucial for maintaining the efficiency and reliability of the heating system.

Keywords: heat supply systems, heat carrier leakage, heating networks, leak detection methods, pipeline networks, digitalization of heat supply, metering device data analysis, heating network failure rate.

References

1. Otchet o sostoyanii teploenergetiki i tsentralizovannogo teplosnabzheniya v Rossiyskoy Federatsii v 2022 godu Ministry of Energy of the Russian Federation [Report on the state and district heating in the Russian Federation in 2022] // Minenergo Rossii. Ministry of Energy of Russian Federation. Moscow, 2023. 161 p. (In Russ.).
2. Pochti tret' teplosetey v Rossii nuzhdayetsya v zamene [Almost a third of heating networks in Russia need replacement] // RTVI. URL: <https://rtvi.com/news/pochti-tret-teplosetey-v-rossii-nuzhdaetsya-v-zamene/> (accessed: 17.01.2025). (In Russ.).
3. Dmitriyev V. Z. Sistemy tsentralizovannogo teplosnabzheniya goroda Omska i puti ikh sovershenstvovaniya [Omsk city district heating systems and ways to improve them]. Natsional'nyye prioritety Rossii. *National Priorities of Russia*. 2019. No. 4. P. 42–47. EDN: TQVEAQ. (In Russ.).
4. El-Zahab S., Zayed T. Leak detection in water distribution networks: an introductory overview. *Smart Water*. 2019. Vol. 4 (1). DOI: 10.1186/s40713-019-0017-x. (In Engl.).
5. Shen Y., Chen J., Fu Q. [et al.]. Detection of district heating pipe network leakage fault using UCB arm selection method. *Buildings*. 2021. Vol. 11 (7). 275. DOI: 10.3390/buildings11070275. (In Engl.).
6. Örn Garðarsson G., Boem F., Toni L. Graph-Based Learning for Leak Detection and Localisation in Water Distribution Networks. *IFAC-PapersOnLine*. 2022. Vol. 55 (6). P. 661–666. DOI: 10.1016/j.ifacol.2022.07.203. (In Engl.).
7. Zhou S., Liu C., Zhao Y. Leakage diagnosis of heating pipe-network based on BP neural network. *Sustainable Energy, Grids and Networks*. 2022. Vol. 32. DOI: 10.1016/j.segan.2022.100869. EDN: FJKAZY. (In Engl.).
8. Van der Walt J. C., Heyns P. S., Wilke D. N. Pipe network leak detection: comparison between statistical and machine learning techniques. *Urban Water Journal*. 2018. Vol. 15 (10). DOI: 10.1080/1573062X.2019.1597375. (In Engl.).
9. Gosudarstvennyy doklad o sostoyanii energosberezheniya i povyshenii energeticheskoy effektivnosti v Rossiyskoy federatsii za 2022 god [State report on energy saving and efficiency in the Russian Federation in 2022] // Ministerstvo ekonomicheskogo razvitiya Rossiyskoy Federatsii. Ministry of Economic Development of the Russian Federation. URL: https://www.economy.gov.ru/material/file/b2ec92f00344707af95c8d44a6abbde8/Energy_efficiency_2023pdf (accessed: 12.11.2024). (In Russ.).
10. Kosyakov S. I., Sadykov A. M., Sennikov V. V., Tikhonov A. I. Metod lokalizatsii mest utechek v teplovykh setyakh na osnove analiza dannykh uzlov ucheta potrebiteley teplovy energii [Method of detection of district heating pipe network leakage using data monitoring of heat energy consumers]. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta. Vestnik IGEU*. 2021. No. 6. P. 70–78. DOI: 10.17588/2072-2672.2021.6.070-078. EDN: IREILE. (In Russ.).

GROKHOTOV Valeriy Yuryevich, Graduate Student, Senior Lecturer of the Heat Power Engineering Department, Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk.
SPIN-code: 9419-6170
ResearcherID: MCJ-1928-2025
Correspondence address: 19valera94@mail.ru
MIKHAILOV Andrey Garrievich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Heat Power Engineering Department, OmSTU, Omsk.
SPIN-code: 7337-8036
AuthorID (RSCI): 385534
AuthorID (SCOPUS): 56503044200
STEPASHKIN Ivan Alexandrovich, Senior Lecturer of the Heat Power Engineering Department, OmSTU, Omsk.
SPIN-code: 3166-3378
AuthorID (RSCI): 948077
AuthorID (SCOPUS): 57214754518

For citations

Grokhotov V. Yu, Mikhailov A. G., Stepashkin I. A. Detection of heat carrier losses in centralized heating systems. *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2025. Vol. 9, no. 1. P. 32–36. DOI: 10.25206/2588-0373-2025-9-1-32-36. EDN: YIUZGT.

Received January 20, 2025.

© V. Yu Grokhotov, A. G. Mikhailov, I. A. Stepashkin