

УПРАВЛЕНИЕ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ОБЪЕКТОВ СТРОИТЕЛЬСТВА

LIFE CYCLE MANAGEMENT OF CONSTRUCTION FACILITIES



УДК 697.34; 004.9

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-4-37-43>

Повышение эффективности этапа проектирования жизненного цикла системы теплоснабжения строительного объекта

А.Л. Тихомиров , Е.П. Лысова 

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

✉ a.l.tikhomirov@yandex.ru



EDN: WYGAXN

Аннотация

Введение. Система теплоснабжения является одним из важнейших инфраструктурных компонентов инженерного обеспечения строительного объекта. Однако процесс моделирования ее жизненного цикла, особенно в части информационного обеспечения, остается недостаточно исследованным в академической среде.

Одним из основных этапов жизненного цикла любой инженерной системы является проектирование. Необходимость повышения энергоэффективности, снижения затрат на проектирование и в последующем строительство систем центрального теплоснабжения, улучшения экологической ситуации подчеркивает особую актуальность внедрения инновационных технологий, в частности, искусственного интеллекта, который может стать эффективным инструментом решения существующих проблем. Цель исследования — повышение эффективности этапа проектирования систем централизованного отопления на основе применения искусственного интеллекта и оценка перспектив такого подхода.

Материалы и методы. Методология исследования включает сравнительный анализ, моделирование, статистическую обработку данных и экспертную оценку. Результаты исследования могут быть использованы при разработке новых подходов к проектированию систем теплоснабжения с применением современных цифровых технологий.

Результаты исследования. Предложенная авторами концепция управления жизненным циклом теплоснабжающих систем, включающая последовательную реализацию пяти ключевых этапов (от предпроектной подготовки до утилизации), позволяет обеспечить комплексный подход к оптимизации всех процессов. При этом критическое значение приобретает стадия проектирования, определяющая базовые параметры энергоэффективности, экономичности и надежности теплоснабжения. В контексте цифровизации теплоэнергетического проектирования особую актуальность приобретает интеграция интеллектуальных автоматизированных систем, реализующих многофакторное алгоритмическое моделирование и оптимизационные расчеты. Современные решения на базе искусственного интеллекта обеспечивают комплексную автоматизацию проектно-конструкторских работ, включая создание детализированных информационных моделей объектов, высокоточное прогнозирование теплопотребления, управление гидравлическими режимами и оптимизацию энергобаланса системы. Внедрение таких технологий не только компенсирует дефицит квалифицированных специалистов и повышает качество проектной документации, но и способствует существенной оптимизации эксплуатационных показателей: снижению топливных затрат и минимизации углеродного следа за счет рационального распределения энергетических ресурсов и сокращения выбросов парниковых газов.

Обсуждение и заключение. Рассмотрены современные подходы к автоматизированному проектированию систем централизованного теплоснабжения с использованием технологий искусственного интеллекта. Предложена методика, основанная на применении машинного обучения, нейронных сетей и оптимизационных алгоритмов для повышения эффективности проектирования, минимизации энергопотерь и снижения эксплуатационных затрат.

Ключевые слова: жизненный цикл, управление жизненным циклом, система теплоснабжения, централизованное теплоснабжение, строительный объект, искусственный интеллект, автоматизированное проектирование, машинное обучение, оптимизация, энергосбережение

Для цитирования. Тихомиров А.Л., Лысова Е.П. Повышение эффективности этапа проектирования жизненного цикла системы теплоснабжения строительного объекта. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2025;4(4):37–43. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-4-37-43>

Improving the Efficiency of the Design Stage of the Life Cycle of the Heat Supply System of a Construction Facility

Alexey L. Tikhomirov , Ekaterina P. Lysova 

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

 a.l.tikhomirov@yandex.ru

Abstract

Introduction. The heat supply system is one of the most important infrastructural components of the engineering support of the construction site. However, the process of modeling its life cycle, particularly in terms of information support, has not been sufficiently researched in the academia.

One of the main stages of the life cycle of any engineering system is design. The need to increase energy efficiency, reduce the cost of designing and, thereby, building central heating systems, and improve the environmental situation highlights the special urgency of introducing innovative technologies, in particular, artificial intelligence that can become an effective tool for solving the existing problems. The aim of the study is to increase the efficiency of the design stage of district heating systems based on the use of artificial intelligence and to assess the prospects for such an approach.

Materials and Methods. The research methodology includes comparative analysis, modeling, statistical data processing and expert assessment. The research results can be used in the development of new approaches to the design of heat supply systems using modern digital technologies.

Research Results. The proposed concept of life cycle management of heat supply systems, which includes the sequential implementation of five key stages (from pre-design preparation to disposal) allows for an integrated approach to optimizing all of the processes. At the same time, the design stage, which determines the basic parameters of energy efficiency, efficiency and reliability of heat supply, is of critical importance. In the context of digitalization of thermal power engineering, the integration of intelligent automated systems implementing multifactorial algorithmic modeling and optimization calculations is becoming particularly relevant. Modern artificial intelligence-based solutions provide comprehensive automation of design and engineering work, including creating detailed information models of facilities, high-precision forecasting of heat consumption, hydraulic control and optimization of the energy balance of the system. The introduction of such technologies not only compensates for the lack of qualified specialists and improves the quality of project documentation, but also contributes to significant optimization of operational performance: reducing fuel costs and minimizing the carbon footprint through rational allocation of energy resources and reduction in greenhouse gas emissions.

Discussion and Conclusion. The article discusses modern approaches to automated design of district heating systems using artificial intelligence technologies. A technique based on the use of machine learning, neural networks, and optimization algorithms is proposed to improve design efficiency, minimize energy loss, and reduce operating costs.

Keywords: life cycle, life cycle management, heat supply system, district heating, construction site, artificial intelligence, computer-aided design, machine learning, optimization, energy saving

For citation. Tikhomirov AL, Lysova EP. Improving the Efficiency of the Design Stage of the Life Cycle of the Heat Supply System of a Construction Facility. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2025;4(4):37–43. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-4-37-43>

Введение. Концепция комплексного управления жизненным циклом прочно входит в арсенал современных инструментов хозяйствования, выступая ключевым фактором оптимизации функционирования различных объектов — от отдельных изделий до масштабных проектов и сложных систем [1, 2]. Особенно значимую роль эта концепция играет в строительной индустрии, где она служит фундаментальной основой для организации эффективной эксплуатации и управления объектами недвижимости, прежде всего капитальными сооружениями различного назначения [3, 4].

Внедрение системного подхода в управлении жизненным циклом позволяет создать целостную систему регулирования и контроля на всех этапах существования объекта, начиная с проектной стадии и заканчивая этапом вывода из эксплуатации. Такой подход обеспечивает не только рациональное использование ресурсов на каждом этапе, но и способствует достижению оптимального баланса между эксплуатационными характеристиками, экономической эффективностью и технологическими параметрами объекта [1–3].

В контексте строительной отрасли данная концепция приобретает особую актуальность, поскольку позволяет учитывать специфику капитальных объектов, их долгосрочный характер использования и необходимость посто-

янного мониторинга технического состояния. При этом системный подход создает прочную основу для внедрения инновационных технологий, оптимизации затрат и повышения качества строительной продукции на всех этапах ее жизненного цикла [4].

В строительной индустрии инженерные системы выступают важнейшим компонентом инфраструктурного обеспечения зданий и сооружений, создавая оптимальные или допустимые параметры микроклимата и обеспечивая комфортность пребывания человека. Несмотря на критическую важность этих систем для эффективной эксплуатации строительных объектов, область моделирования их жизненного цикла, в том числе информационного, остается недостаточно исследованной в академической среде и в настоящее время представлена в научной литературе фрагментарно [5–7]. Это создает существенный пробел в развитии теоретических основ управления инженерными системами на протяжении всех этапов их функционирования.

Современные системы централизованного теплоснабжения должны учитывать множество факторов, таких как рост урбанизации, увеличение спроса на комфорт и возможность индивидуального управления микроклиматом. Традиционные методы проектирования и управления системами теплоснабжения часто не справляются с этими вызовами, что приводит к ошибкам при проектировании, неоправданным материальным затратам при строительстве, перерасходу энергии, увеличению теплопотерь и снижению надежности при эксплуатации.

Организации, осуществляющие проектирование систем теплоснабжения, сталкиваются с рядом трудностей, включая необходимость повышения энергоэффективности, снижения затрат на проектирование и строительство систем, улучшения экологической ситуации. Значительной проблемой последних лет стал дефицит специалистов-проектировщиков в области разработки полнообъемных информационных моделей систем теплоснабжения. Одним из ключевых инструментов для решения этих задач является использование искусственного интеллекта (ИИ).

В статье авторы исследуют возможность повышения эффективности этапа проектирования систем централизованного отопления на основе применения искусственного интеллекта, а также преимущества и перспективы такого подхода.

Материалы и методы. В рамках исследования был осуществлен комплексный анализ жизненного цикла системы теплоснабжения зданий и сооружений с использованием метода аналогий, сравнительного и системного синтеза. Детальное изучение этапов жизненного цикла, включая проектирование, монтаж, эксплуатацию и модернизацию, подтвердило возможность разработки адаптивного механизма управления системой на всех этапах ее существования.

Предметом исследования выступила система централизованного теплоснабжения, а главной целью стало изучение направлений использования искусственного интеллекта для полной автоматизации процесса проектирования — особо значимого этапа жизненного цикла, на котором закладывается энергоэффективность, экономичность, надежность и экологичность будущих систем теплоснабжения.

Применение технологий искусственного интеллекта позволит не только систематизировать накопленные научные и практические данные, но и выявить закономерности функционирования системы теплоснабжения, что откроет новые перспективы для оптимизации ее жизненного цикла и повышения энергоэффективности.

Результаты исследования. В современных условиях развития городской инфраструктуры системы централизованного теплоснабжения характеризуются значительным разнообразием конструктивных и технических решений. Постоянно расширяющаяся номенклатура основного и вспомогательного оборудования создает определенные сложности при выборе системы централизованного теплоснабжения. Это обуславливает необходимость тщательного учета многочисленных параметров и характеристик каждого элемента сложной инженерной структуры системы централизованного теплоснабжения. Особую актуальность приобретает задача разработки методологии выбора оптимальной системы централизованного теплоснабжения, способной обеспечить требуемый уровень эффективности, безопасности и экономической целесообразности при минимальных эксплуатационных затратах. Комплексный подход к решению данной задачи требует всестороннего анализа всех аспектов функционирования системы на протяжении всего жизненного цикла.

Методологически обоснованным представляется исследование жизненного цикла системы централизованного теплоснабжения через реализацию пяти последовательных этапов: предпроектной подготовки, проектирования, непосредственной эксплуатации, модернизации и утилизации (рис. 1).

Каждый из указанных этапов характеризуется стадиями реализации, определяющими текущее состояние системы, необходимый комплекс работ и ожидаемые результаты их выполнения. Анализ этапов позволяет сформировать целостное представление о функционировании системы централизованного теплоснабжения и разработать рекомендации по оптимизации ее работы в долгосрочной перспективе.



Рис. 1. Структура жизненного цикла системы центрального теплоснабжения строительного объекта

Этап проектирования систем централизованного теплоснабжения приобретает особую значимость, поскольку именно на этом этапе закладывается фундамент энергоэффективности и надежности будущих объектов теплоснабжения. Однако острый дефицит квалифицированных специалистов-проектировщиков, особенно в сфере разработки полнообъемных информационных моделей систем теплоснабжения, создает существенные риски для качества проектной документации и эффективности функционирования будущих систем отопления. Как следствие, происходит увеличение сроков проектирования, рост количества проектных ошибок и удорожание строительства из-за необходимости корректировок [8].

Цифровая трансформация проектирования выступает как стратегический инструмент повышения качества проектной документации и обеспечения надежности функционирования теплоэнергетических объектов [9–11]. Автоматизированные системы проектирования представляют собой комплекс программно-технических средств, реализующих алгоритмическое моделирование и оптимизацию проектных решений. Их внедрение позволяет нивелировать риски, связанные с дефицитом высококвалифицированных специалистов, и обеспечить требуемый уровень качества проектной документации. Основная задача автоматизированного проектирования заключается

в создании системы, способной анализировать входные данные (географические, климатические, технические) и генерировать оптимальные проектные решения с минимальным участием человека [12–14].

Искусственный интеллект предоставляет уникальные возможности для полной автоматизации процесса проектирования (разработки информационной модели) системы теплоснабжения на всех этапах [15–17]. С помощью искусственного интеллекта можно точно прогнозировать потребление теплоты, стабилизировать гидравлические режимы и минимизировать потери энергии. Это позволяет не только снизить затраты на топливо, но и улучшить экологическую ситуацию за счет уменьшения выбросов CO₂.

Автоматизация этапа проектирования в жизненном цикле системы централизованного теплоснабжения позволяет включить стадии, в течение которых осуществляют:

- разработку инженерной цифровой модели местности (инженерные изыскания);
- размещение потребителей теплоты на топоплане;
- нанесение магистральных и внутриквартальных тепловых сетей на геодезической подоснове;
- разработку продольного профиля тепловых сетей;
- сбор и анализ данных (сбор данных о потреблении теплоты, колебаниях температуры и т.п.);
- проведение гидравлического расчета и разработку тепловых и гидравлических режимов системы;
- разработку математической модели (на основе собранных данных создают математическую модель, которая позволяет прогнозировать тепловые и гидравлические режимы с высокой степенью точности).

Использование в этапе проектирования систем централизованного теплоснабжения искусственного интеллекта добавляет новый элемент — машинное обучение для прогнозирования тепловых нагрузок.

Обучение искусственного интеллекта осуществляют в первую очередь на нормативных документах для установления технологических ограничений и лучших образцах проектных решений для развития оптимального «мышления» искусственного интеллекта.

Для точного прогнозирования тепловых нагрузок применимы:

- 1) методы регрессионного анализа и нейронные сети (например, LSTM-сети), которые способны учитывать временные ряды данных, такие как температура окружающей среды, историческое потребление тепла и социально-экономические факторы;
- 2) генетические алгоритмы для оптимизации конфигурации сети (позволяют находить оптимальную топологию тепловой сети, минимизируя длину трубопроводов, потери давления и стоимость строительства; при этом каждое решение кодируется в виде хромосомы, а процесс оптимизации включает скрещивание, мутацию и отбор наиболее эффективных вариантов);
- 3) нейросетевые модели для гидравлических расчётов (искусственные нейронные сети используют для моделирования гидравлических режимов в сложных разветвленных сетях; обучение сети проводится на основе данных, полученных из численных имитаций поведения сложных систем или процессов, что позволяет быстро оценивать параметры системы — давление, расход теплоносителя — при изменении условий эксплуатации);
- 4) интеграция с GIS-системами (для учета географических факторов (рельеф, расположение зданий, инфраструктура) предложено интегрировать систему проектирования с геоинформационными системами (GIS); это позволяет автоматически генерировать карты тепловых сетей и анализировать пространственные данные);
- 5) тестирование и оптимизация (разработанная система проходит тестирование на реальных данных, после чего производят ее оптимизацию для достижения максимальной эффективности);
- 6) валидация и верификация цифровой информационной модели системы теплоснабжения;
- 7) передача цифровой информационной модели системы теплоснабжения с применением XML-схем на следующий этап жизненного цикла системы.

Обсуждение и заключение. Внедрение автоматизированных систем проектирования является не просто технологическим трендом, а объективной необходимостью, обусловленной современными требованиями к энергоэффективности и надежности систем централизованного теплоснабжения. Цифровая трансформация проектирования создает предпосылки для формирования нового качества проектных решений, что в конечном итоге приводит к оптимизации капитальных вложений и эксплуатационных затрат на всех этапах жизненного цикла теплоэнергетических объектов.

Применение искусственного интеллекта в проектировании систем теплоснабжения предоставляет ряд значительных преимуществ:

- снижение дефицита квалифицированных инженеров-проектировщиков;
- резкое снижение затрат времени на проектирование с одновременным ростом качества проектов;
- возможность использования разработанной цифровой информационной модели системы теплоснабжения на последующих этапах жизненного цикла системы.

Проектирование системы теплоснабжения с использованием искусственного интеллекта является перспективным направлением, которое позволяет значительно повысить эффективность управления теплоэнергетическими процессами. Внедрение таких систем способствует экономии энергии, улучшению экологической ситуации и созданию комфортной среды для проживания граждан. В будущем ожидается дальнейшее развитие и совершенствование подобных технологий, что сделает их еще более востребованными в сфере теплоэнергетики.

Список литературы/References

1. Жданов В.Ю. Новый взгляд на этапы жизненного цикла организации. *Московский экономический журнал*. 2021;6:378–388. URL: <https://gclnk.com/W9hQ7Iaa> (дата обращения 12.09.2025).
2. Zhdanov VYu A New Look at the Stages of the Organization's Life Cycle. *Moscow Economic Journal*. 2021;6:378–388. (In Russ.) URL: <https://gclnk.com/W9hQ7Iaa> (accessed: 12.09.2025)
3. Агibalова В.Г., Баша И.В., Суббота А.В., Вассуф Ф.С. Особенности управления организацией с учетом стадий жизненного цикла. *Естественно-гуманитарные исследования*. 2023;5(49):367–370. URL: <https://academiyadt.ru/online-zhurnal-estestvenno-gumanitarnye-issledovaniya-egi-49/> (дата обращения 12.09.2025).
Agibalova VG, Basha IV, Subbota AV, Wassuf FS Features of Organization Management Taking into Account the Stages of the Life Cycle. *Natural Sciences and Humanities Research*. 2023;5(49):367-370. (In Russ.) URL: <https://academiyadt.ru/online-zhurnal-estestvenno-gumanitarnye-issledovaniya-egi-49/> (accessed: 12.09.2025).
4. Федосов С.В., Федосеев В.Н., Зайцева И.А., Воронов В.А. Управление жизненным циклом устойчивого состояния объекта строительства. *Эксперт: теория и практика*. 2023;3(22):131–137. http://doi.org/10.51608/26867818_2023_3_131
Fedosov SV, Fedoseev VN, Zayceva IA, Voronov VA Life Cycle Management of the Steady State of the Construction Object. *Expert: Theory and Practice*. 2023;3(22):131–137. (In Russ.) http://doi.org/10.51608/26867818_2023_3_131
5. Топчий Д.В. Организационно-технические решения по обеспечению качества строительно-монтажных работ на различных этапах жизненного цикла объекта строительства. *Вестник МГСУ*. 2023;18(2):283–292. <http://doi.org/10.22227/1997-0935.2023.2.283-292>
Topchiy DV Organizational and Technical Solutions to Ensure the Quality of Construction and Installation Works at Various Stages of the Life Cycle of a Construction Project. *Bulletin of MGSU*. 2023;18(2):283–292. (In Russ.) <http://doi.org/10.22227/1997-0935.2023.2.283-292>
6. Беспалов В.И., Гурова О.С., Лысова Е.П., Гришин Г.С. Анализ жизненного цикла парогазотурбинных ТЭЦ. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2022;1(4):32–43. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2022-1-4-32-43>
Bespalov VI, Gurova OS, Lysova EP, Grishin GS Life Cycle of Analysis of Steam and Gas Turbine CHP Plants. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2022;1(4):32–43. (In Russ.) <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2022-1-4-32-43>
7. Тихомиров А.Л., Пирожникова А.П. Формирование принципов количественного регулирования параметров системы теплоснабжения на основе анализа ее жизненного цикла. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2023;2(2):29–35. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-2-29-35>
Tikhomirov AL, Pirozhnikova AP Creating Quantitative Regulation Principles of the Heating Networks' Parameters Based on the Life Cycle Analysis. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2023;2(2):29–35. (In Russ.) <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-2-29-35>
8. Тихомиров А.Л., Пирожникова А.П. Разработка информационной модели системы теплоснабжения на различных этапах ее жизненного цикла. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2022;1(3):35–42. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2022-1-3-35-42>
Tikhomirov AL, Pirozhnikova AP Development of an Information Model of a Heat Supply System at Various Stages of the Life Cycle. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2022;1(3):35–42. (In Russ.) <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2022-1-3-35-42>
9. Новицкий Н.Н. Методические проблемы интеллектуализации трубопроводных систем и направления развития теории гидравлических цепей для их решения. В: *Труды XIV Всероссийского научного семинара «Математические модели и методы анализа и оптимального синтеза развивающихся трубопроводных и гидравлических систем»*. Иркутск: Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН; 2014. С. 301–318.
Novitsky NN Methodological Problems of Intellectualization of Pipeline Systems and Directions of Development of the Hydraulic Circuit Theory for their Solution. *Proceedings of the 14th All-Russian Scientific Seminar. Melentiev Energy Systems Research Institute SB RAS "Mathematical Models and Methods of Analysis and Optimal Synthesis of Developing Pipeline and Hydraulic Systems"*. Irkutsk: Publishing House of the Melentiev Energy Systems Research Institute SB RAS; 2014. pp. 301–318. (In Russ.)

10. Stennikov V.A., Barakhthenko E.A., Sokolov D.V. Determination of optimal parameters of heating systems based on advanced information technologies. *Energy Systems Research*. 2018;1(1):84–93. <https://doi.org/10.25729/esr.2018.01.0010>
11. Vesterlund M., Toffolo A., Dahl J. Optimization of multi-source complex district heating network, a case study. *Energy*. 2017;126:53–63. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.03.018>
12. Guelpa E., Sciacovelli A., Verda V. Thermo-fluid dynamic model of large district heating networks for the analysis of primary energy savings. *Energy*. 2019;184:34–44. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.07.177>
13. Новицкий Н.Н. Развитие теории гидравлических цепей для решения задач управления функционированием теплоснабжающих систем. *Теплоэнергетика*. 2009;12:38–43.
- Novitsky NN Development of the Hydraulic Circuit Theory for Solving the Problems of Controlling the Functioning of Heat Supply Systems. *Thermal Power Engineering*. 2009;12:38–43. (In Russ.)
14. Vesterlund M., Dahl J. A method for the simulation and optimization of district heating systems with meshed networks. *Energy conversion and management*. 2015;89:555–567. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.10.002>
15. Jie P., Tian Z., Yuan S., Zhu N. Modeling the dynamic characteristics of a district heating network. *Energy*. 2012;39(1):126–134. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.01.055>
16. Chertkov M., Novitsky N. N. Thermal transients in district heating systems. *Energy*. 2019;184:22–33. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.01.049>
17. Lazzaretto A., Toffolo A., Morandin M., von Spakovsky M.R. Criteria for the decomposition of energy systems in local/global optimizations. *Energy*. 2010;35(2):1157–1163. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.06.009>
18. Nardo A.D., Cavallo A., Natale M.D., Greco R., Santonastaso G.F. Dynamic control of water distribution system based on network partitioning. *Procedia engineering*. 2016;154:1275–1282. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.460>

Об авторах:

Тихомиров Алексей Леонидович, кандидат технических наук, доцент кафедры теплогазоснабжения, климатической и альтернативных энергоустановок Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [ORCID](https://orcid.org/0000-0001-9151-1000), a.l.tikhomirov@yandex.ru

Лысова Екатерина Петровна, кандидат технических наук, доцент кафедры теплогазоснабжения, климатической и альтернативных энергоустановок Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [ScopusID](https://scopus.org/authorid/57201123000), [ORCID](https://orcid.org/0000-0001-9151-1000), katerina.lysova0803@gmail.com

Заявленный вклад соавторов:

А.Л. Тихомиров: формирование основной концепции, анализ результатов исследований, корректировка выводов, графическое оформление, доработка текста.

Е.П. Лысова: цели и задачи исследования, анализ результатов исследований, корректировка выводов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Alexey L. Tikhomirov, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Heat and Gas Supply, Climate Engineering and Alternative Energy Installations at the Don State Technical University (1 Gagarin Square, Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [ORCID](https://orcid.org/0000-0001-9151-1000), a.l.tikhomirov@yandex.ru

Ekaterina P. Lysova, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Heat and Gas Supply, Climate Engineering and Alternative Energy Installations at the Don State Technical University (1 Gagarin Square, Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [ScopusID](https://scopus.org/authorid/57201123000), [ORCID](https://orcid.org/0000-0001-9151-1000), katerina.lysova0803@gmail.com

Claimed Contributorship:

AL Tikhomirov: formation of the basic concept, analysis of the research results, correction of the conclusions, graphic design, revision of the manuscript.

EP Lysova: aims of the study, analysis of the research results, correction of the conclusions.

Conflict of interest statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final version of manuscript.

Поступила в редакцию / Received 29.09.2025

Поступила после рецензирования / Reviewed 12.10.2025

Принята к публикации / Accepted 02.11.2025