

РАЗВИТИЕ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ И ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ ТЕПЛОСЕТИ В РАМКАХ КОНЦЕПЦИИ ИНДУСТРИЯ 4.0

Одноруков Дмитрий Александрович
Аспирант, Российский новый университет
odnorukovda@yandex.ru

DEVELOPMENT OF DISTRICT HEATING AND THE USE OF DIGITAL TWINS OF THE HEATING NETWORK WITHIN THE FRAMEWORK OF THE INDUSTRY 4.0 CONCEPT

D. Odnorukov

Summary. The article discusses the need to modernize district heating systems using the latest technologies and environmentally friendly fuels to improve their efficiency and reduce losses. Particular attention is paid to digitalization and the development of an electronic control system, which is relevant for Russia in the context of economic and social challenges. The impact of Industry 4.0 and 5.0 technologies, such as IoT, IIoT, Big Data, artificial intelligence and machine learning, on accelerating the digitalization of heating networks is analyzed. The benefits of using digital twins in the management of heating networks are described, including increased efficiency, reduced operating costs and incident prevention. The use of several specialized digital twins is considered as the most flexible and effective approach to managing complex systems, demonstrating high economic efficiency.

Keywords: district heating systems, digitalization, Industry 4.0 and 5.0, digital twins, technology, market, object, system.

Аннотация. В статье рассматривается необходимость модернизации систем централизованного теплоснабжения с применением новейших технологий и экологичных видов топлива для повышения их эффективности и снижения потерь. Особое внимание уделяется цифровизации и разработке электронной системы управления, что актуально для России в контексте экономических и социальных вызовов. Анализируется влияние технологий Индустрии 4.0 и 5.0, таких как IoT, IIoT, Big Data, искусственный интеллект и машинное обучение, на ускорение цифровизации тепловых сетей. Описываются преимущества использования цифровых двойников в управлении тепловыми сетями, включая повышение эффективности, снижение операционных расходов и предотвращение инцидентов. Применение нескольких специализированных цифровых двойников рассматривается как наиболее гибкий и эффективный подход к управлению сложными системами, демонстрируя высокую экономическую эффективность.

Ключевые слова: системы централизованного теплоснабжения, цифровизация, Индустрия 4.0 и 5.0, цифровые двойники, технология, рынок, объект, система.

Введение

Централизованное теплоснабжение является неотъемлемой частью городской инфраструктуры, обеспечивающей комфортное проживание и рациональное использование энергетических ресурсов. Развитие систем централизованного теплоснабжения прошло через несколько поколений, каждое из которых внесло существенные улучшения в эффективность, надежность и экологичность. В статье [1] рассмотрены пять поколений систем централизованного теплоснабжения, начиная с первых установок и заканчивая современными, высокотехнологичными решениями. Прогресс в сфере централизованного теплоснабжения четвертого и пятого поколений неразрывно связан с активным использованием информационных технологий, что способствует улучшению управления на всех этапах процессов генерации, распределения и использования тепловой энергии, обеспечивая автоматический мониторинг в режиме реального времени. Это позволяет создавать современную, быстро адаптирующуюся к изменениям инфраструктуру для региональных и городских систем теплоснабжения.

В последние годы концепции Индустрии 4.0 и Индустрии 5.0 стали ключевыми факторами, влияющими на развитие различных отраслей, включая теплоэнергетику. Индустрия 4.0 фокусируется на интеграции киберфизических систем, промышленного интернета вещей (IIoT), больших данных (BigData) и искусственного интеллекта (AI) в производственные процессы [2]. В то время как Индустрия 5.0 ставит акцент на взаимодействие человека и машины, коллаборативные роботизированные системы и более персонализированный подход к производству и обслуживанию [3].

Цифровизация в теплоэнергетической отрасли приобретает все большее значение. Одним из наиболее перспективных направлений является создание цифровых двойников сети теплоснабжения. Цифровые двойники представляют собой виртуальные модели реальных систем, которые позволяют проводить мониторинг, анализ и оптимизацию работы теплосетей в режиме реального времени. Их внедрение способствует снижению эксплуатационных затрат, уменьшению выбросов парниковых газов и повышению надежности систем теплоснабжения.

Таким образом, анализ поколений систем централизованного теплоснабжения, концепций Индустрии 4.0 и 5.0, а также цифровизация в теплоэнергетике и создание цифровых двойников, позволяет глубже понять текущие тенденции и перспективы развития этой важной отрасли.

1. Современные вызовы и проблемы централизованного теплоснабжения

Система теплоснабжения Российской Федерации состоит из 50 тыс. локальных систем теплоснабжения и 18 тыс. обслуживающих предприятий. Общая протяженность тепловых сетей составляет 167 тыс. километров [4]. Около 30 % (51,5 тыс. км) трубопроводов теплосетей требуют замены [5], а около 23 % (38,8 тыс. км) всех сетей являются ветхими (износ свыше 60 %) [6]. В период 2014–2019 гг. темпы замены сетей не превышали 2 %, а количество нуждающихся теплосетей практически не менялось (около 48 тыс. км) [7]. Реальные тепловые потери по экспертным оценкам составляют в среднем до 20 %, что приводит к ежегодному ущербу более, чем 200 млрд.

В России доля потребителей, оплачивающих тепло по счетчикам, составляла в 2019 г. 55 %, согласно данным в Стратегии развития строительной отрасли и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации на период до 2030 года с прогнозом до 2035 года [4].

Системы централизованного теплоснабжения в настоящее время сталкиваются с проблемами в надежности, энергоэффективности и экологии, что делает необходимой их глубокую модернизацию на основе технического обновления, внедрения новых технологий мониторинга и управления, а также перехода на более чистые и эффективные виды топлива. Важно также полностью и своевременно обеспечивать требуемую тепловую нагрузку перспективных объектов капитального строительства. В последние годы страна столкнулась с новыми экономическими и социальными вызовами из-за внешнего давления и ограничений, требующими мобилизации ресурсов и разработки новых стратегических подходов. Важнейшими задачами являются: снижение потерь, повышение энергетической эффективности и снижение аварийности на сетях теплоснабжения и объектах капитального строительства.

В стратегических планах развития строительного сектора и сферы жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации акцентируется важность широкого внедрения и интеграции цифровых технологий. Основная задача цифровизации заключается в создании и совершенствовании электронной системы управления всем жизненным циклом объектов капитального строительства, а также сопутствующей инфраструктуры, что позволит адекватно реагировать на текущие вызовы.

2. Индустрия 4.0 и 5.0: Влияние на цифровизацию сетей теплоснабжения

Развитие технологий Индустрии 4.0 и Индустрии 5.0 оказывает значительное влияние на цифровизацию сетей теплоснабжения, приводя к повышению их эффективности, надежности и устойчивости. Эти технологии включают интернет вещей (IoT), промышленный интернет вещей (IIoT), большие данные (Big Data), искусственный интеллект (AI) и машинное обучение. Они позволяют создать умные системы управления теплом, которые могут прогнозировать и оптимизировать работу сетей теплоснабжения в реальном времени.

В России и за ее пределами активно развиваются системы централизованного теплоснабжения четвертого и пятого поколений (4th and 5th Generation District Heating — GDH) [8]. Эти системы направлены на обеспечение теплом зданий с минимальными потерями энергии в сетях и сниженным уровнем потребления энергии. Эволюция этих поколений систем централизованного теплоснабжения и влияние технологий Индустрии 4.0 и 5.0 на их развитие показаны на рис. 1. С постепенным переходом от 3GDN к 5GDHC уменьшается температура теплоносителя (от $<100^{\circ}\text{C}$ до $5\text{--}25^{\circ}\text{C}$) и увеличивается энергетическая эффективность.

IoT и IIoT являются ключевыми компонентами цифровизации сетей теплоснабжения. Они включают в себя использование датчиков и умных счетчиков, которые собирают данные о температуре, давлении, расходе теплоносителя и других параметрах в режиме реального времени. Эти данные передаются в облачные системы для дальнейшего анализа и управления.

Сбор и анализ большого объема данных (Big Data) позволяет более точно мониторить состояние теплосетей и выявлять тенденции и аномалии. Это помогает в оптимизации работы систем, снижении эксплуатационных затрат и предотвращении аварийных ситуаций.

Искусственный интеллект (AI) и машинное обучение играют важную роль в анализе данных и прогнозировании поведения систем теплоснабжения. Эти технологии позволяют разрабатывать модели для оптимизации работы сетей, предсказания спроса на тепло и управления ресурсами более эффективно.

Прогнозирование и оптимизация работы систем теплоснабжения на основе данных, собранных с помощью IIoT, Big Data и AI, позволяют существенно улучшить их эффективность, оптимизировать режимы работы котлов и насосов, предсказать пиковые нагрузки и разработать стратегию управления ими, планировать профилактические и ремонтные работы и предотвращать аварии.

ПОКОЛЕНИЯ СИСТЕМ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

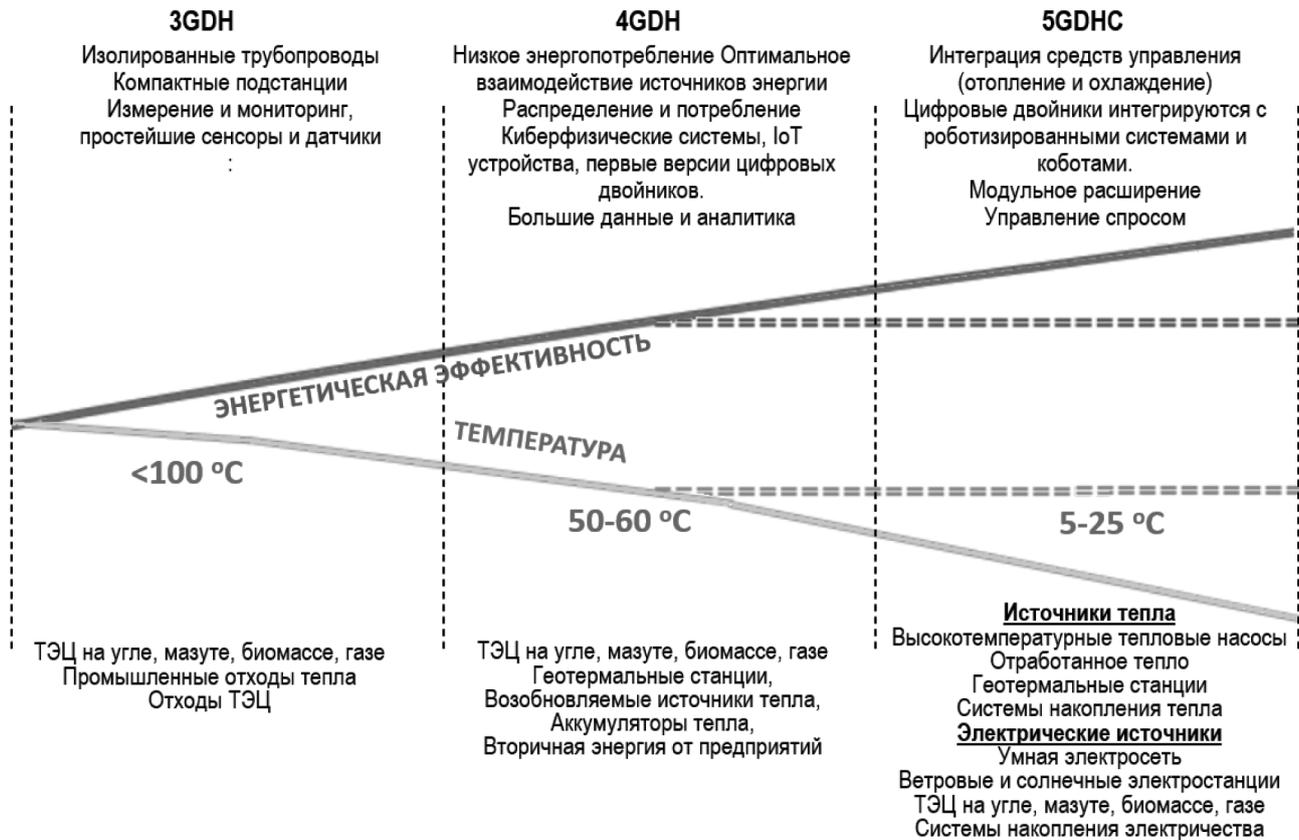


Рис. 1. Поколения систем централизованного теплоснабжения и взаимосвязь с концепцией Индустрии 4.0 и 5.0.

3. Цифровые двойники теплосетей

Разработка цифровых двойников представляет собой одно из ключевых направлений цифровизации отрасли. Цифровые двойники (ЦД) тепловой сети появляются на этапе внедрения технологий Индустрии 4.0, и их развитие продолжается в Индустрии 5.0. В контексте систем централизованного теплоснабжения это соответствует переходу к 4-му поколению систем (4GDH) и дальнейшему развитию в 5-м поколении (5GDH). По прогнозу института Гартнера к 2034 году объем рынка программного обеспечения и сервисов, связанных с моделированием цифровых двойников (SDT), достигнет 379 миллиардов долларов США, т.е. увеличится более чем в 10 раз, по сравнению с 35 миллиардами долларов США в 2024 году. Цифровые двойники, используемые для моделирования сложных систем, обычно интегрируют аналитику, искусственный интеллект и различные данные и компоненты из множества поддерживающих технологий [9].

ЦД — это виртуальная модель объекта и происходящих в нем процессов, которая взаимодействует с реальным объектом для сбора информации [10]. Он позволяет отслеживать температуру, давление и расход теплоносителя, тепловой баланс, выявлять тепловые и коммер-

ческие потери. Благодаря методам машинного обучения и искусственного интеллекта, ЦД анализирует данные для прогнозирования сбоев и оптимизации работы сети, помогая предотвратить аварии и улучшить эффективность ее работы. Предоставляемые ЦД визуальные инструменты мониторинга и рекомендации помогают лицу, принимающему решения (ЛПР), управлять теплосетью, обеспечивая оперативное реагирование на проблемы, планировать техническое обслуживание, а также принимать обоснованные экономические решения.

Технология ЦД основана на междисциплинарном моделировании, которое включает интеграцию результатов численного моделирования структурных элементов и физических процессов в системе, обеспечивая обмен данными между компонентами системы. Принципы сбора, обработки и обмена данными в системе централизованного теплоснабжения с применением цифровых двойников, показаны на рисунке 2.

Структурированная схема системы централизованного теплоснабжения с применением трех специализированных ЦД состоит из ряда подсистем разного уровня, объединенных вместе для выполнения конкретных функций управления, мониторинга и анализа.

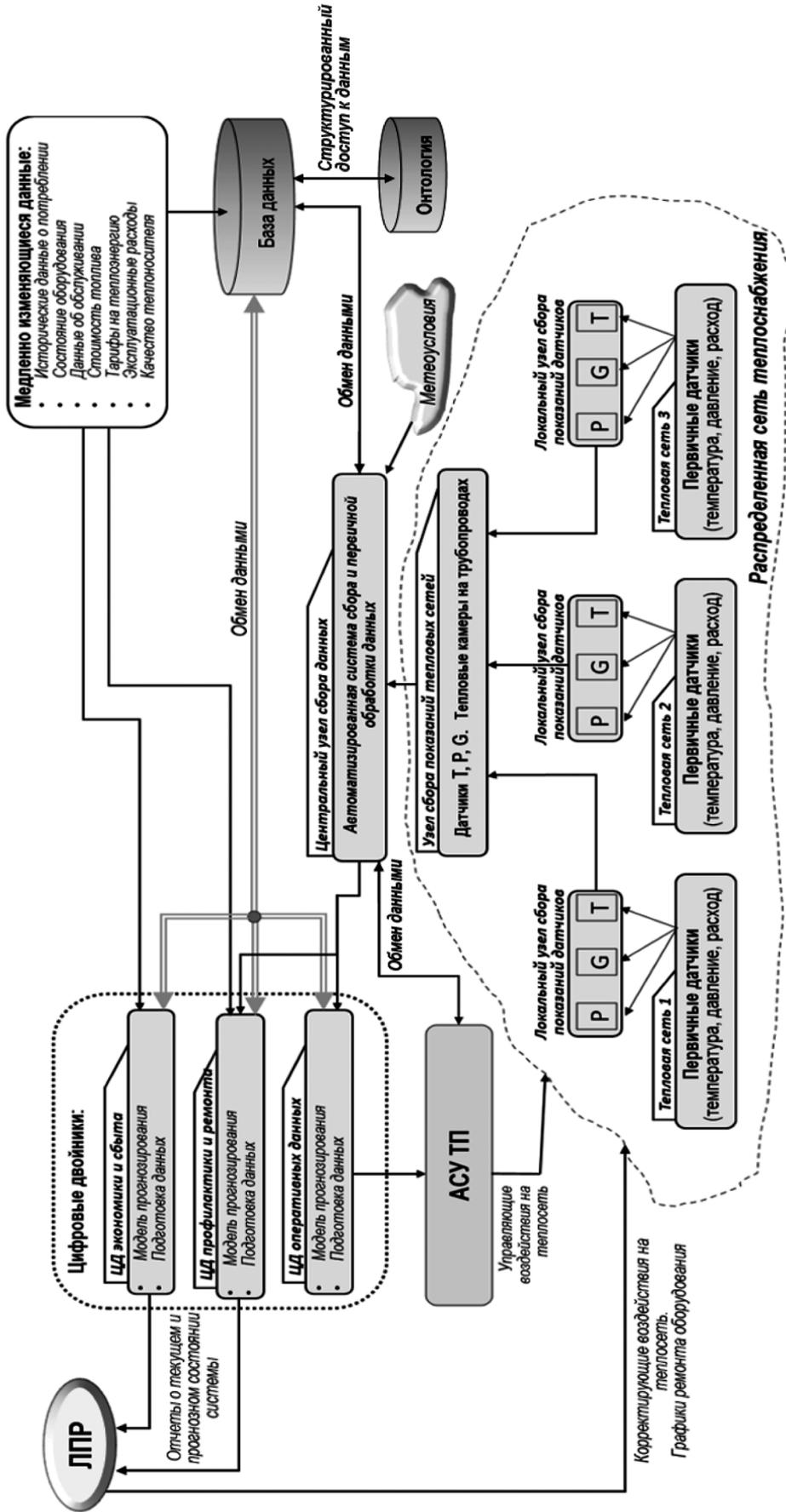


Рис. 2. Система управления сетью централизованного теплоснабжения с применением цифровых двойников

На нижнем уровне расположены узлы сбора показаний с датчиков давления (D), температуры (T) и расхода (G) в локальных теплосетях (1,2,3 ...). На втором уровне системы эти показания агрегируются, а также собираются данные с тепловых камер на трубопроводах (температура и влажность) для оценки тепловых потерь в них. Все собранные данные, а также информация по метеоусловиям поступают в центральный узел сбора и первичной обработки данных, а затем передаются в единую базу данных. База данных (БД) служит для хранения как оперативных, так и медленно изменяющихся данных, таких как исторические данные, информация о состоянии и обслуживании оборудования, эксплуатационные расходы и т.д. Для улучшения взаимодействия между различными компонентами сложной системы, часто используют онтологический инжиниринг. В [11] представлена онтология предметной области теплоэнергетики, которую можно использовать как основу для обеспечения структурированного доступа к данным в БД, а также помощи в быстром поиске необходимой информации.

Важной частью всей системы является автоматизированная подсистема управления технологическими процессами (АСУ ТП), которая на основании собранных и проанализированных данных в автоматическом режиме формирует управляющие воздействия на исполнительные механизмы теплосети для оптимизации ее работы и повышения эффективности.

В системе предусмотрено три вида специализированных цифровых двойников: ЦД экономики и сбыта, ЦД профилактики и ремонта и ЦД оперативных данных. Эти компоненты предназначены для моделирования и прогнозирования различных аспектов работы теплосети, от экономических показателей до планов ремонта и оперативного управления сетью теплоснабжения. В основе работы цифрового двойника лежит анализ собранных разнородных данных с применением статистических методов, методов машинного обучения и искусственного интеллекта для выявления закономерностей и интеграции различных источников информации. Все это создает комплексную базу для улучшения прогнозов и оптимизации процессов. На основе требований к модели выбирается соответствующий подход (например, нейронные сети или регрессионные модели) и применяются специальные алгоритмы для обработки данных. Модель ЦД валидируется в реальных условиях и адаптируется для оптимальной интеграции в систему.

Отчеты о текущем и прогнозируемом состоянии сети теплоснабжения поступают к ЛПР (лицо, принимающее решение) для последующего анализа и выработки корректировок управляющих решений.

Использование нескольких специализированных цифровых двойников — наиболее распространенный

подход в области теплоснабжения, также, как и во многих других сложных промышленных и инфраструктурных системах. Это обусловлено следующими факторами:

1. Сложность системы теплоснабжения: разветвленная сеть теплоснабжения состоит из многочисленных узлов и элементов — от производства и передачи тепла до его распределения и потребления. Управление такой системой в реальном времени, планирование ее технического обслуживания, анализ экономической эффективности и соответствие нормативным требованиям делают использование единого цифрового двойника крайне непрактичным.
2. Специализация задач: отдельные аспекты управления системой теплоснабжения требуют глубоких знаний и специализированных инструментов анализа. Например, оперативный контроль будет работать более эффективно, если использовать ЦД, разработанный специально для этой цели, в то время как экономический анализ потребности в тепле и его сбыт потребуют совсем другого подхода и инструментария.
3. Техническая и программная реализация: разработка и поддержка единого ЦД для всей системы могут быть чрезвычайно затратны и технически сложны. Использование нескольких специализированных цифровых двойников позволяет разделить задачу на более мелкие и управляемые части, что упрощает разработку, интеграцию с существующими системами и последующую поддержку.
4. Гибкость и масштабируемость: специализированные ЦД могут быть адаптированы и масштабированы в соответствии с изменяющимися потребностями конкретной области управления. Это позволяет системе быть гибкой и быстро адаптироваться к новым вызовам, технологиям и регуляторным требованиям.

Таким образом, использование нескольких специализированных ЦД является наиболее гибким и эффективным подходом к управлению такими сложными системами, как теплоснабжение, поскольку это позволяет точно настроить аналитические и оперативные инструменты для решения узкоспециализированных задач.

4. Анализ потерь в теплосетях с помощью цифровых двойников

Внедрение цифровых двойников в систему управления тепловыми режимами и энергопотреблением зданий стало значительным шагом к повышению энергоэффективности и экономии ресурсов. Ниже рассмотрим несколько примеров.

В Нидерландах исследовались 4 пилотных района в городе Твенте, где использовалась технология цифро-

вого двойника для оптимизации потребления тепловой энергии [12]. Была использована общедоступная геоинформационная модель в комплексе ArcGIS для моделирования ежемесячного и годового спроса на энергию для отопления помещений с использованием программного комплекса SimStadt. В результате было обнаружено, что годовая потребность в энергии для отопления, включающая как отопление помещений, так и горячее водоснабжение, завышена во всех 4 случаях, в диапазоне от 3,6 % для Ботховена (наиболее однородный район, состоящий только из новых жилых зданий) до 124,8 % для Твеккелервелда (зданий старой застройки, неоднородные по высоте.). После оптимизации моделей, основываясь на актуальных данных, пересмотре уставок и исправлении предположений о внутренних нагрузках, удалось значительно уменьшить энергопотребление на отопление и повысить точность прогнозов.

Группой компаний Т-плюс завершен проект по созданию автоматизированной системы управления теплоснабжением города Екатеринбург [13]. Система теплоснабжения в столице Урала — одна из самых сложных (протяженность квартальных и магистральных сетей в городе превышает 2 тыс. км). Реализация проекта началась с глубокой автоматизации на каждом участке, начиная от производства тепла на ТЭЦ и заканчивая установкой приборов учета в домах, создания центральных и индивидуальных тепловых пунктов. Итогом стала стройная система, получившая название «Цифровой двойник системы теплоснабжения», которая автоматически адаптируется к погодным условиям, обеспечивая стабильную температуру горячей воды и комфорт в помещениях. В результате энергоэффективность тепловой сети увеличилась, а тепловые потери сократились на 10 %.

Система централизованного теплоснабжения города Москвы является одним из самых сложных и динамично развивающихся объектов коммунальной инженерной инфраструктуры в мире. В Москве система теплоснабжения работает неэффективно из-за недостаточной интеграции с градостроительными планами, экологической политикой, экономикой города и потребительскими интересами. Чтобы решить проблемы системы теплоснабжения Москвы, актуально создание интегрированной

электронной модели. Это потребует первоначального создания общей базы данных о всех элементах системы, на основе которой будет разработана модель для учёта, контроля и планирования развития теплоснабжения города. Департамент ЖКХ Москвы опубликовал проект «Актуализации схемы теплоснабжения города Москвы на период до 2035 года (актуализация на 2023 год)» [14]. Электронная модель теплоснабжения будет способствовать экономичному, качественному и надёжному обеспечению теплом потребителей с минимизацией воздействия на окружающую среду. Она позволит быстро реагировать на аварии, эффективно управлять сетью, способствовать развитию и расширению системы, упростить подключение новых потребителей и повысить качество услуг на основании анализа данных. Также модель будет способствовать экологическому улучшению в городе.

Заключение

Централизованные системы теплоснабжения требуют модернизации с применением новейших технологий и экологических видов топлива для повышения эффективности и снижения потерь. В России особое внимание уделяется цифровизации и созданию электронной системы управления для улучшения контроля за жизненным циклом объектов.

Технологии Индустрии 4.0 и 5.0, такие как IoT, IIoT, Big Data, AI и машинное обучение, ускоряют цифровизацию сетей теплоснабжения, повышая их эффективность, надёжность и устойчивость. Цифровые двойники способствуют улучшению управления тепловыми сетями, снижению операционных расходов и предотвращению инцидентов, обеспечивая высокое качество обслуживания пользователей.

Разработана структурная схема системы управления сетью централизованного теплоснабжения с применением нескольких цифровых двойников, что является гибким и эффективным подходом к управлению сложными системами теплоснабжения, позволяя точно настроить аналитические и оперативные инструменты. Реальные примеры, приведенные в статье, демонстрируют высокую экономическую эффективность их применения.

ЛИТЕРАТУРА

- Петрова И.Ю., Музафаров Р.Р. Системы централизованного теплоснабжения для умных городов. Инженерно-строительный вестник Прикаспия: научно-технический журнал. 2021;4(38):90–95.
- Lund H. Perspectives on fourth and fifth generation district heating / H. Lund, P.A. Ostergaard, T.B. Nielsen, S. Werner, J.E. Thorsen, O. Gudmundsson, A. Arabkoohsar, B.V. Mathiesen // Energy. — 2021. — Vol. 227. — Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544221007696> (дата обращения 20.09.2021)
- Евгеньев Г.Б. Индустрия 5.0 как интеграция Интернета знаний и Интернета вещей // Онтология проектирования. 2019. №1 (31). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/industriya-5-0-kak-integratsiya-interneta-znaniy-i-interneta-veschey> (дата обращения: 10.06.2024).
- Стратегия развития строительной отрасли и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации на период до 2030 года с прогнозом до 2035 года, распоряжение Правительства Российской Федерации от 31 октября 2022 г. № 3268-п, URL: <http://static.government.ru/media/files/AdmXczBBUgfgNM8tz16r7RkQcsgP3LAM.pdf>

5. Кашеев В., Поляков В. Российские тепловые сети — нужны безотлагательные меры, Коммунальный комплекс России № 1 (211), 2022 с. 10–14
6. Пузаков, В.С. Схемы теплоснабжения городов России 10 лет спустя: опыт, проблемы, тенденции, Научные труды ИИП РАН (2023): с.55–74 URL: <https://ecfor.ru/publication/o-sostoyanii-sfery-teplosnabzheniya-v-rf-energoeffektivnost/>,
7. Российские тепловые сети — пора принимать меры, URL: <https://www.mosflowline.ru/technology/publikatsii/rossiyskie-teplovye-seti-pora-prinimat-mery.php>, (дата обращения: 13.06.2024).
8. Gudmundsson, Oddgeir & Dyrelund, Anders & Thorsen, Jan. (2021). Comparison of 4th and 5th generation district heating systems. E3S Web of Conferences. 246. 09004. 10.1051/e3sconf/202124609004.
9. Emerging Tech: Revenue Opportunity Projection of Simulation Digital Twins, URL: <https://www.gartner.com/en/documents/5451563>, (дата обращения: 14.06.2024)
10. Салов И.В., Щербатов И.А., Салова Ю.А. Применение цифровых двойников и киберфизических систем на объектах генерации тепловой и электрической энергии // International Journal of Open Information Technologies. 2022. №3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-tsifrovyyh-dvoynikov-i-kiberfizicheskikh-sistem-na-obektah-generatsii-teplovoy-i-elektricheskoy-energii> (дата обращения: 13.06.2024).
11. Массель, Л.В. Онтологический подход к построению цифровых двойников объектов и систем энергетики / Л.В. Массель, Т.Н. Ворожцова // Онтология проектирования. — 2020. — Т.10, №3(37). — С.327–337. — DOI: 10.18287/2223-9537-2020-10-3-327-337.
12. Rovers, Twan & Struck, Christian & Gieling, Chris & Mohammadi, Saleh & Slagmolen, Olaf & Dorée, André & olde Scholtenhuis, Léon & Vink, Karina & Poppe, Hans & Koopman, Daniëlle & ter Maat, Herbert & Boeve, Berto. (2023). Development and evaluation of digital twins for district-level heating energy demand simulation. 10.34641/clima.2022.399.
13. Уральская цифровизация теплоснабжения URL: tplus.interfax.ru/ekaterinburg.html, (дата обращения: 17.06.2024)
14. Уведомление о размещении проекта Актуализации схемы теплоснабжения города Москвы на период до 2035 года (актуализация на 2023 год), URL: <https://www.mos.ru/dgkh/documents/skhemy/view/268973220/>, (дата обращения: 17.06.2024)

© Одноруков Дмитрий Александрович (odnorukovda@yandex.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»