

Технические науки. Строительство

DOI: <https://doi.org/10.63377/3005-4966.2-2026-02>

УДК: 641.643

МРНТИ: 44.31.35

Повышение надежности тепловых сетей на основе технологий самодиагностики и предиктивного анализа**¹Салихова С.Б., *¹Ниембай С.Е.**¹ Международная образовательная корпорация, Алматы к., Қазақстан*Автор-корреспондент e-mail: s.nietbay@mok.kz

Поступила: 12 апреля 2026 Рецензирование: 05 мая 2026 Принята в печать: 05 июня 2026	Аннотация В статье выполнен сравнительный анализ научных методов повышения надежности систем централизованного теплоснабжения на основе самодиагностики, машинного обучения и предиктивного анализа. Рассмотрены методы обнаружения утечек и аномалий, предиктивного обслуживания тепловых подстанций, прогнозирования тепловой нагрузки и оптимизационного управления теплопотреблением зданий. В методологической части приведены не сведения об авторах, а техническая сущность методов и оборудование, на котором они могут быть реализованы: датчики температуры, давления и расхода, SCADA-система, тепловая подстанция, беспилотная инфракрасная диагностика, тепловой насос и контур управления зданиями. В результатах представлены таблицы и графики сравнения методов по точности, экономии энергии, раннему выявлению дефектов и применимости к тепловым сетям. Установлено, что наиболее рациональным вариантом является гибридная система, объединяющая прогноз нагрузки, FDD-диагностику, обнаружение аномалий и оптимизационное управление. Ключевые слова: тепловые сети, надежность, самодиагностика, предиктивный анализ, машинное обучение, обнаружение аномалий, прогнозирование тепловой нагрузки, FDD, SCADA
Салихова С.Б.	Информация об авторах: Магистрант, Казахская головная архитектурно-строительная академия. г. Алматы, Республика Казахстан. ORCID ID: https://orcid.org/0009-0009-7825-9868 E-mail: symbat.salikhova@bk.ru
Ниембай С.Е.	PhD, ассоциированный профессор, Международная образовательная корпорация. г. Алматы, Республика Казахстан., г. Алматы, Республика Казахстан. ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-9748-6830 E-mail: s.nietbay@mok.kz

Техникалық ғылымдар. Құрылыс

DOI: <https://doi.org/10.63377/3005-4966.2-2026-02>

ӨОЖ: 641.643

ГТАМР: 44.31.35

Өзін-өзі диагностикалау және болжамдық талдау технологиялары негізінде жылу желілерінің сенімділігін арттыру**¹Салихова С.Б., *¹Ниетбай С.Е.**¹ Халықаралық білім беру корпорациясы, Алматы қ., Қазақстан* Хат алмасу үшін автор (корреспондент-автор): s.nietbay@mok.kz

Қабылданды: 12 сәуір, 2026 жыл Рецензиялау: 05 мамыр, 2026 жыл Баспаға қабылданды: 05 маусым, 2026 жыл	Түйіндеме Мақалада өзін-өзі диагностикалау, машиналық оқыту және болжамдық талдау негізінде орталықтандырылған жылумен жабдықтау жүйелерінің сенімділігін арттырудың ғылыми әдістеріне салыстырмалы талдау жүргізілді. Жылу желілеріндегі ағып кетулер мен аномалияларды анықтау, жылу қосалқы станцияларына болжамдық қызмет көрсету, жылу жүктемесін болжау және ғимараттардың жылу тұтынуын оңтайландырылған басқару әдістері қарастырылды. Әдістемелік бөлімде авторлар туралы мәліметтер емес, әдістердің техникалық мәні және оларды іске асыруға қажетті жабдықтар көрсетілді: температура, қысым және шығын датчиктері, SCADA жүйесі, жылу қосалқы станциясы, ұшқышсыз инфрақызыл диагностика, жылу сорғысы және ғимараттарды басқару контуры. Нәтижелерде әдістер дәлдік, энергия үнемдеу, ақауларды ерте анықтау және жылу желілеріне қолдану мүмкіндігі бойынша кестелер мен графиктер арқылы салыстырылды. Зерттеу нәтижесінде ең ұтымды нұсқа жүктемені болжау, FDD-диагностика, аномалияларды анықтау және оңтайландырылған басқаруды біріктіретін гибриді жүйе екені анықталды. Түйін сөздер: жылу желілері, сенімділік, өзін-өзі диагностикалау, болжамдық талдау, машиналық оқыту, аномалияларды анықтау, жылу жүктемесін болжау, FDD, SCADA
Салихова С.Б.	Авторлар туралы ақпарат: Магистрант, Халықаралық білім беру корпорациясы, Алматы қаласы, Қазақстан Республикасы. ORCID ID: https://orcid.org/0009-0009-7825-9868 E-mail: symbat.salikhova@bk.ru
Ниетбай С.Е.	PhD, қауымдастырылған профессор, Халықаралық білім беру корпорациясы, Алматы қ., Қазақстан Республикасы. ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-9748-6830 E-mail: s.nietbay@mok.kz

Technical sciences: Construction

DOI: <https://doi.org/10.63377/3005-4966.2-2026-02>

UDC: 641.643

IRSTI: 44.31.35

Improving the Reliability of Heat Networks Based on Self-Diagnostics and Predictive Analysis Technologies¹ Salikhova S., *¹ Nietbay S.¹ International Educational Corporation, Almaty, Kazakhstan*Corresponding author e-mail: s.nietbay@mok.kz

Received: April 12, 2026 Under review: May 05, 2026 Accepted for publication: June 05, 2026	Abstract The article presents a comparative analysis of scientific methods for improving the reliability of district heating systems based on self-diagnostics, machine learning and predictive analytics. Methods for leak and anomaly detection, predictive maintenance of district heating substations, heat-load forecasting and optimization control of building heat consumption are considered. The methodological section describes not biographical information about the authors, but the technical essence of the methods and the equipment required for their implementation: temperature, pressure and flow sensors, a SCADA system, district heating substations, unmanned infrared diagnostics, heat pumps and building control loops. The results include tables and graphs comparing the methods in terms of accuracy, energy savings, early defect detection and applicability to heat networks. It is established that the most rational option is a hybrid system combining load forecasting, FDD diagnostics, anomaly detection and optimization control. Keywords: heat networks, reliability, self-diagnostics, predictive analytics, machine learning, anomaly detection, heat-load forecasting, FDD, SCADA
Makhmetov A.A.	Information about authors: Master's student, International Educational Corporation, Almaty, Republic of Kazakhstan. ORCID ID: https://orcid.org/0009-0009-7825-9868 E-mail: symbat.salikhova@bk.ru
Nietbay S.E.	PhD, Associate Professor, International Educational Corporation, Almaty, Republic of Kazakhstan. ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-9748-6830 E-mail: s.nietbay@mok.kz

1. Введение

Системы централизованного теплоснабжения являются важной частью инженерной инфраструктуры города. Их надежность определяет устойчивость отопления, качество теплоснабжения потребителей, уровень тепловых потерь и безопасность эксплуатации. При высокой степени износа трубопроводов и оборудования традиционная модель обслуживания, основанная на устранении уже произошедшей аварии, становится недостаточной. Поэтому актуальным направлением является переход к проактивной эксплуатации, при которой дефект выявляется до развития аварийного события.

В современных исследованиях повышение надежности связывается с цифровизацией тепловых сетей. В работе [1] показано, что для тепловых сетей Казахстана перспективно применение машинного обучения при прогнозировании тепловой нагрузки, обнаружении аномалий, выявлении утечек и раннем распознавании отказов оборудования. Среди методов выделяются пороговый контроль, DBSCAN, Isolation Forest и автоэнкодеры.

В исследовании [2] рассмотрены методы обнаружения утечек в системах централизованного теплоснабжения. Особое внимание уделено модельным методам, data-driven подходам и беспилотной инфракрасной термографии; эти направления также связаны с развитием низкотемпературных и интеллектуальных тепловых сетей [9, 11, 14]. Утечка рассматривается как один из наиболее опасных дефектов, поскольку она одновременно вызывает потерю теплоносителя, снижение давления, рост тепловых потерь и риск повреждения оборудования.

В работе [3] предложен подход к предиктивному обслуживанию тепловых подстанций на основе размеченных эксплуатационных данных. Исследование показывает, что модели обнаружения неисправностей могут выявлять 60 % дефектов до обращения потребителя, а среднее время упреждения составляет 3-5 дней. Данное направление опирается на предыдущие исследования по FDD-диагностике подстанций, маркировке отклонений и автоматизированному выявлению дефектов [10, 12, 13, 15]. Это важно для практики, потому что эксплуатационная служба получает время для проверки оборудования и планирования ремонта.

В исследовании [4] показано применение адаптивной прогнозной модели и обучения с подкреплением для управления теплоснабжением зданий. Получена экономия тепловой энергии 7,40-14,85 %, а в отдельные периоды более 20 %. Такой результат показывает, что надежность тепловой сети повышается не только за счет ремонта трубопроводов, но и за счет снижения перегрева, пиков нагрузки и неэффективных режимов.

Прогнозирование тепловой нагрузки подробно рассмотрено в работе [5]. Предложенная гибридная модель BiLSTM-TCN достигает ошибки MAPE 2,47 %. Для тепловых сетей это означает возможность более точного планирования режима источников тепла, насосов и тепловых пунктов. Таким образом, прогноз нагрузки становится основой предиктивного управления и самодиагностики.

Цель статьи — сравнить научные методы повышения надежности тепловых сетей и определить наиболее рациональный подход для исследования. Для достижения цели рассматриваются техническая сущность методов, необходимое оборудование, количественные результаты и практическая применимость к системам теплоснабжения.

2. Материалы и методы

Методология исследования основана на сравнении методов, применяемых для диагностики, прогнозирования и оптимизации работы тепловых сетей. Сравнение выполнено по объекту применения, виду оборудования, типу исходных данных, количественным результатам и влиянию на надежность (табл.1). В статье рассматриваются четыре группы методов: мониторинг и сбор данных, обнаружение утечек и аномалий, предиктивное обслуживание подстанций, прогнозирование и оптимизационное управление.

Таблица 1. Сравнительная характеристика источников, объектов исследования и методов

Источник / работа	Объект исследования	Методы	Количественный результат	Значение для надежности
[1] Тепловые сети Казахстана	магистральные и распределительные тепловые сети	пороговый контроль, DBSCAN, Isolation Forest, автоэнкодеры	обоснована гибридная стратегия ИИ для перехода к обслуживанию по фактическому состоянию	показывает локальную применимость самодиагностики для условий Казахстана
[2] Диагностика утечек в DHS	трубопроводы, участки сети, зоны тепловпотерь	модельные методы, data-driven, IoT/SCADA, беспилотная инфракрасная термография	показана необходимость сочетания нескольких методов из-за сложности сетей	формирует методическую базу раннего обнаружения утечек и тепловых аномалий
[3] Предиктивное обслуживание подстанций	93 тепловые подстанции	EnergyFaultDetector, автоэнкодеры, ARCANA, FDD	accuracy 0,98; F0.5 = 0,83; 60 % неисправностей выявлены заранее	дает практический пример раннего предупреждения и объяснимой диагностики
[4] Управление зданиями в DHN	148 жилых зданий	adaptive context-aware transformer + DQN reinforcement learning	экономия тепла 7,40–14,85 %, в отдельные периоды более 20 %	снижает перегрев, пики нагрузки и эксплуатационную нагрузку на сеть
[5] Прогнозирование тепловой нагрузки	теплообменные станции	BiLSTM для восстановления пропусков + TCN для прогноза	MAPE = 2,47 %	повышает точность режимного планирования и предотвращает неэффективную подачу тепла
[6] Геотермальная DHN	водяная и CO ₂ -сеть	термодинамическое и экономическое сравнение	LCON 0,21 → 0,16 €/кВт·ч; глубина бурения 5 → 4 км	показывает влияние схемы сети на устойчивость и стоимость теплоснабжения

Первый методический блок — цифровой мониторинг. Он включает установку датчиков температуры, давления, расхода, тепловой энергии, контроллеров PLC/RTU и передачу данных в SCADA. Эти данные являются основой для всех последующих методов: без них невозможно построить прогноз нагрузки, выявить аномалию и подтвердить фактическое состояние оборудования [1, 12, 13].

Измеряемые параметры становятся входом для ML-моделей, FDD и прогноза нагрузки
SCADA / архив данных

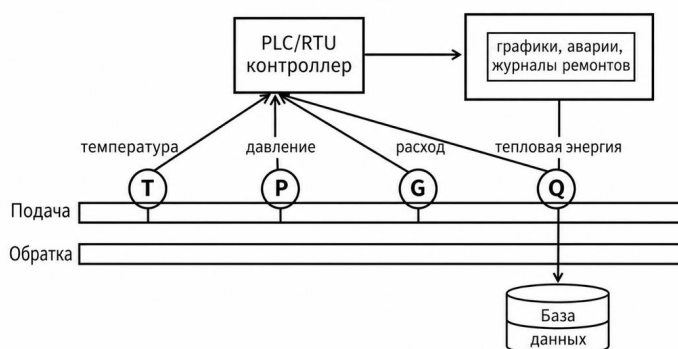


Рисунок 1. Оборудование цифрового мониторинга: датчики, контроллер и SCADA-система [материал автора]

Второй блок — диагностика тепловой подстанции. Подстанция является узлом, где взаимодействуют сетевой теплоноситель, контур здания, теплообменник, насосы, регулирующая арматура и датчики. Неисправность одного элемента может проявляться через изменение температуры обратной воды, перепада давления или расхода. Поэтому FDD-диагностика подстанций требует многомерных данных и сопоставления параметров с нормальным режимом [3, 10, 12, 15].

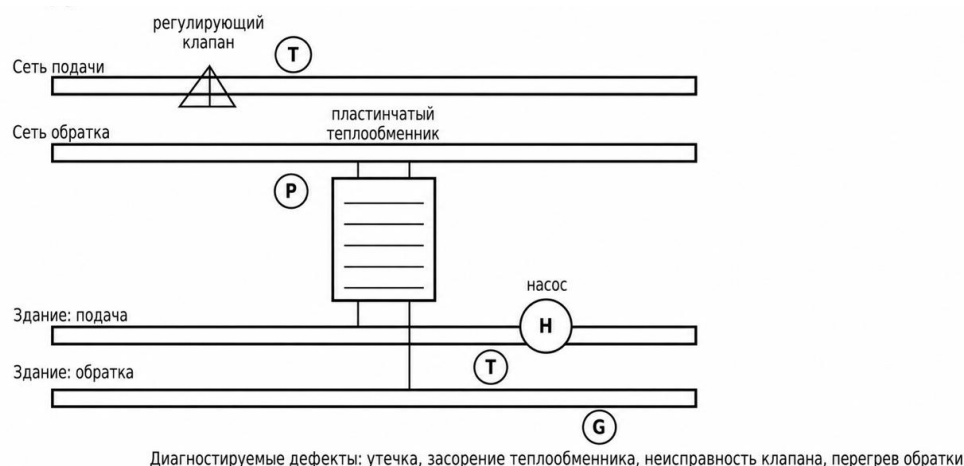


Рисунок 2. Оборудование тепловой подстанции для FDD-диагностики [материал автора]

Третий блок — обнаружение утечек и тепловых аномалий на трассе. Для этого могут использоваться данные давления и расхода, а также беспилотная инфракрасная термография. UAV с тепловизионной камерой позволяет обследовать протяженные участки без вскрытия грунта и выявлять зоны повышенной температуры на поверхности, которые могут указывать на утечку или дефект теплоизоляции [2, 14].

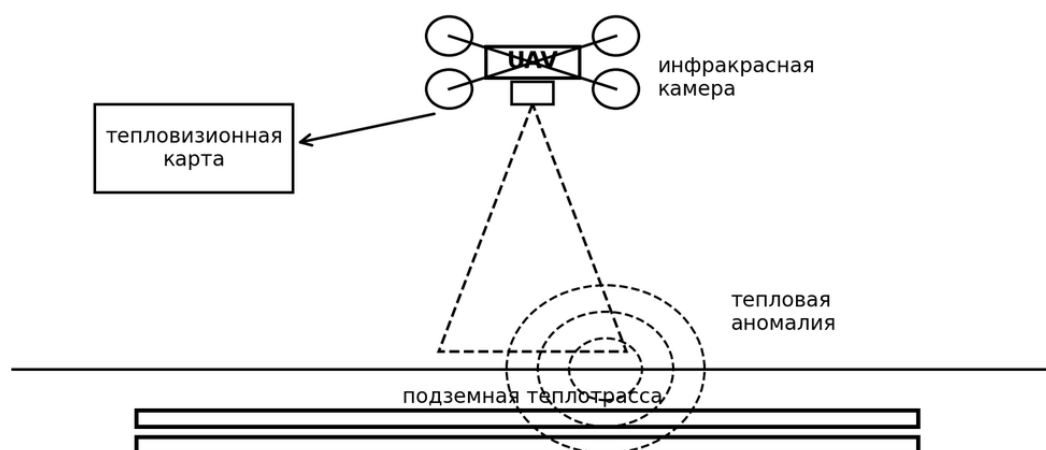


Рисунок 3. Оборудование для беспилотной инфракрасной диагностики тепловой трассы [материал автора]

Четвертый блок — прогнозирование и оптимизационное управление. В него входят модели прогноза нагрузки, тепловые насосы, аккумуляторы тепла, здания-потребители и управляющий алгоритм. Такой блок позволяет снижать перегрев, выравнивать график нагрузки и использовать тепловую инерцию здания. Для этого применяются BiLSTM-TCN, transformer-модели и reinforcement learning при обязательном соблюдении ограничений безопасности [4,5].

Оборудование оптимизационного управления теплотреблением



Метод: прогноз нагрузки + управление НР/зданиями с ограничениями безопасности

Рисунок 4. Оборудование оптимизационного управления: тепловой насос, аккумулятор и здания-потребители [материал автора]

Таблица 2. Сравнение методов, оборудования и исходных данных

Метод	Оборудование	Исходные данные	Назначение	Ограничения
Пороговый контроль	датчики Т, Р, G; SCADA	температура, давление, расход	быстрое выявление грубых отклонений	не выявляет скрытые дефекты
DBSCAN / Isolation Forest	SCADA, база временных рядов	многомерные эксплуатационные параметры	обнаружение аномальных режимов	требуется настройки признаков
Автоэнкодер / FDD	тепловая подстанция, датчики, сервисные отчеты	нормальные режимы и метки дефектов	раннее обнаружение неисправностей	нужна история данных и проверка
BiLSTM-TCN	архив нагрузки, погода, узлы учета	тепловая нагрузка, пропуски, погодные факторы	прогноз нагрузки с учетом временной динамики	не классифицирует дефект напрямую
UAIT	БПЛА, тепловизор, GIS	тепловые изображения трассы	выявление зон теплопотерь и утечек	зависит от погоды и условий съемки
RL / оптимизация	тепловой насос, контроллер, здания	температуры, нагрузка, ограничения	экономия энергии и снижение перегрева	сложно внедрять без цифровой среды

3. Результаты

Результаты сравнения показывают, что разные методы повышают надежность по-разному. Одни методы направлены на раннее обнаружение дефекта, другие — на точное прогнозирование нагрузки, третьи — на экономичное управление режимом. Поэтому итоговый выбор должен учитывать не только точность алгоритма, но и то, какую инженерную задачу он решает.

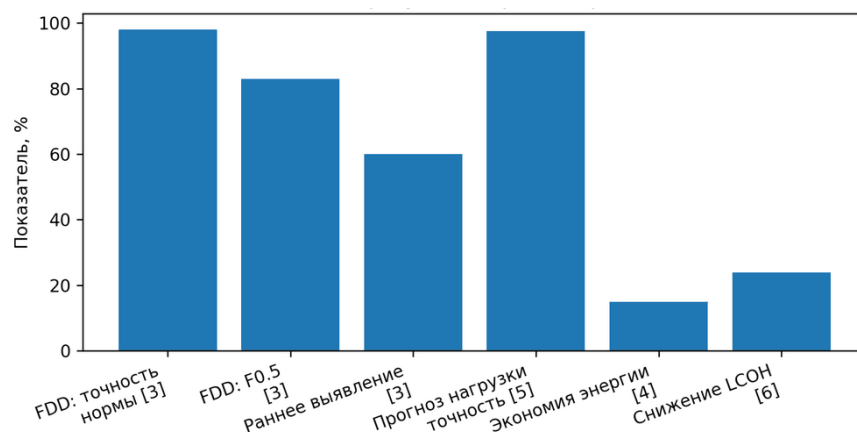


Рисунок 5. Количественные результаты рассмотренных методов [материал автора]

На рисунке 5 видно, что наибольшая точность в численном выражении достигается при распознавании нормального поведения подстанции — 98 % [3]. Однако для практической эксплуатации важна не только точность нормального режима, но и способность выявлять реальные дефекты с малым числом ложных тревог. Поэтому показатель $F0.5 = 83\%$ является более информативным для оценки FDD-диагностики.

Для прогнозирования тепловой нагрузки наилучший результат среди рассмотренных методов показывает BiLSTM-TCN: ошибка MAPE составляет 2,47 %, то есть расчетная точность прогноза приблизительно равна 97,53 % [5]. Данный метод особенно полезен в условиях пропусков данных, потому что BiLSTM восстанавливает пропущенные значения, а TCN извлекает временные признаки из последовательности.

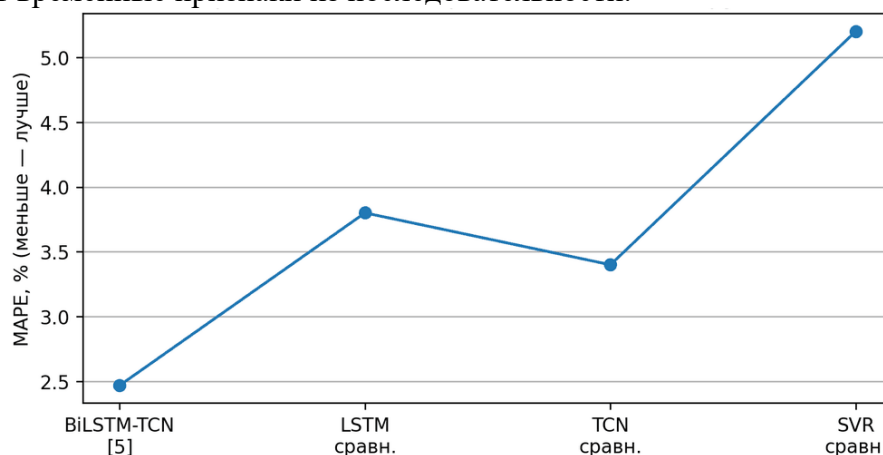


Рисунок 6. Сравнение ошибки прогноза тепловой нагрузки [материал автора]

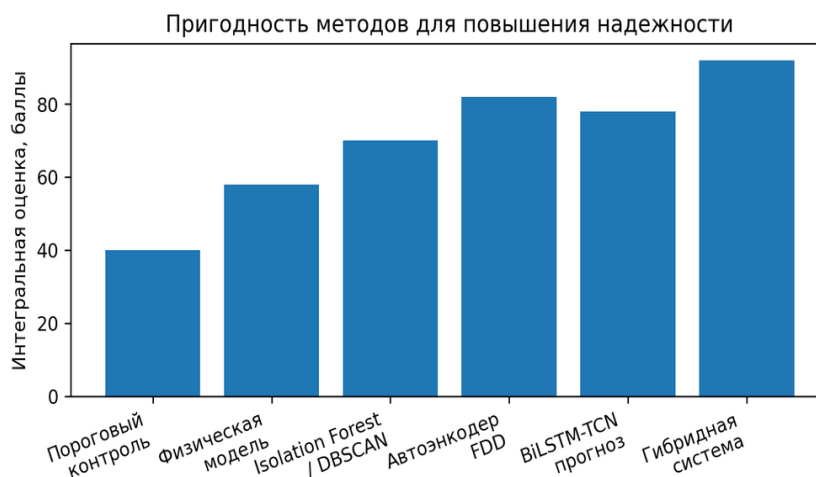
Метод оптимизационного управления с reinforcement learning дает другой тип результата: не диагностику дефекта, а снижение потребления тепловой энергии. В исследовании [4] экономия составила 7,40-14,85 %, а в отдельные периоды превышала 20 %. Для надежности это важно, потому что уменьшение перегрева снижает температурное напряжение сети, нагрузку на насосы и вероятность неэффективных режимов.

Термоэкономическое сравнение геотермальных схем показывает, что выбор схемы теплоснабжения также влияет на надежность и экономику. В работе [6] CO₂-сеть снижает LCON с 0,21 до 0,16 €/кВт·ч, что соответствует снижению примерно на 23,8 %. Кроме того, необходимая глубина бурения уменьшается с 5 до 4 км. Этот результат показывает, что будущие тепловые сети должны рассматриваться как единая система источников, сетей, оборудования и цифрового управления.

Таблица 3. Количественные результаты сравнения методов

Показатель	Метод / источник	Значение	Инженерный смысл
Точность нормального режима	FDD подстанций [3]	98 %	надежное отделение нормального состояния от подозрительного
Событийная точность	FDD подстанций [3]	F0.5 = 83 %	уменьшение ложных тревог при диагностике дефектов
Раннее выявление	FDD подстанций [3]	60 %, 3-5 дней	возможность запланировать ремонт до жалобы потребителя
Ошибка прогноза	BiLSTM-TCN [5]	MAPE = 2,47 %	точное планирование нагрузки и режима источника
Экономия энергии	Transformer + DQN [4]	7,40-14,85 %, пик >20 %	снижение перегрева и пиков нагрузки
Снижение LCON	CO2-DHN [6]	-23,8 %	экономическая устойчивость выбранной схемы

Для выбора рекомендуемого подхода методы были сопоставлены по пяти критериям: способность к раннему обнаружению, точность, интерпретируемость, требования к данным и практическая применимость. Наименьшую оценку получает традиционный пороговый контроль, так как он фиксирует в основном уже выраженные отклонения. Наиболее высокую оценку получает гибридная система, где прогноз нагрузки, FDD и оптимизация работают совместно.

**Рисунок 7.** Интегральная оценка пригодности методов для повышения надежности [материал автора]**Таблица 4.** Сводная оценка методов для применения в тепловых сетях

Критерий	Пороговый контроль	ML-аномалии	FDD/автоэнкодер	BiLSTM-TCN	Гибридная система
Раннее предупреждение	низкое	среднее	высокое	косвенное	очень высокое
Точность	средняя	зависит от данных	до 98 % для нормального режима	MAPE 2,47 %	зависит от модулей
Объяснимость	высокая	средняя	средняя/высокая при ARCANA	средняя	высокая при инженерной интерпретации

Критерий	Пороговый контроль	ML-аномалии	FDD/автоэнкодер	BiLSTM-TCN	Гибридная система
Требования к данным	низкие	средние	высокие	средние/высокие	высокие
Рекомендация	только базовый уровень	для пилотной самодиагностики	для подстанций	для прогноза нагрузки	основной рекомендуемый вариант исследования

4. Обсуждение

Сравнение показывает, что методы нельзя ранжировать только по одному числу. Например, BiLSTM-TCN дает высокую точность прогноза нагрузки, но не определяет причину неисправности. FDD-модель подстанции выявляет дефекты, но требует размеченных сервисных данных. UAIT полезна для обследования трассы, но зависит от погодных условий и качества съемки. Поэтому в литературе наиболее обоснованным считается комбинирование методов мониторинга, FDD, статистической диагностики и экспертной оценки [10, 12, 13, 15]. Дополнительные исследования по 4GDH, низкотемпературным режимам, статистической диагностике и классификации отклонений подтверждают необходимость комплексного подхода к надежности тепловых сетей [9-15].

Для темы исследования наиболее важны три группы работ. Первая группа показывает, что для тепловых сетей Казахстана необходим переход к проактивному управлению на основе данных [1]. Вторая группа показывает методы обнаружения утечек, включая data-driven подходы и тепловизионное обследование [2]. Третья группа показывает практическую возможность предиктивного обслуживания подстанций с использованием реальных эксплуатационных данных и сервисных отчетов [3].

Методы прогнозирования и оптимизации отражают будущее тепловых сетей. Прогноз нагрузки с ошибкой 2,47 % [5] позволяет заранее готовить систему к изменению спроса. Обучение с подкреплением обеспечивает экономию тепла до 14,85 %, а в отдельные периоды более 20 % [4]. Эти методы не заменяют ремонт трубопроводов, но делают эксплуатацию более управляемой и позволяют учитывать переход к 4-му и 5-му поколениям тепловых сетей [9, 11].

С практической точки зрения внедрение должно быть поэтапным. На первом этапе необходимо создать цифровую базу данных: датчики, SCADA, журналы ремонтов и привязку аварий к временным рядам. На втором этапе внедряется прогноз нагрузки и базовое обнаружение аномалий. На третьем этапе формируется FDD-модуль для подстанций. На четвертом этапе возможна оптимизация режима с учетом ограничений безопасности.

Для условий Казахстана рекомендуется начинать с пилотного участка тепловой сети или группы тепловых пунктов. Это позволит проверить качество данных, настроить пороги, обучить модели аномалий и оценить долю подтвержденных сигналов. После этого систему можно масштабировать на другие районы, корректируя модель под особенности схемы сети, износа оборудования и состава потребителей.

Рекомендуемая модель повышения надежности должна состоять из нескольких связанных модулей. Модуль данных собирает параметры температуры, давления, расхода, подпитки, наружной температуры и состояния оборудования. Модуль предобработки восстанавливает пропуски, удаляет выбросы и синхронизирует временные ряды. Модуль прогноза нагрузки определяет ожидаемый режим работы сети. Модуль самодиагностики выявляет отклонения от нормального состояния. Модуль FDD определяет вероятную причину дефекта. Модуль рекомендаций формирует инженерное действие: проверить участок, обследовать трассу, настроить клапан, проверить насос или запланировать ремонт.

Такой подход отличается от аварийной эксплуатации тем, что решение принимается до развития серьезного дефекта. Если фактический расход, давление или температура

обратной воды отклоняются от прогноза, система формирует предупреждение. Если предупреждение подтверждается несколькими признаками, объект получает повышенный приоритет обслуживания. Если сигнал подтвержден полевым обследованием, информация возвращается в базу данных и используется для дальнейшего обучения модели.

Наиболее рациональный вариант для исследования — гибридная система. В ней BiLSTM-TCN или аналогичная модель используется для прогноза нагрузки; Isolation Forest, DBSCAN или автоэнкодер — для обнаружения аномалий; FDD-модуль — для классификации дефектов; а оптимизационный алгоритм — для снижения перегрева и пиков теплотребления. Такой вариант обеспечивает как техническую надежность, так и энергетическую эффективность.

5. Заключение

В работе выполнен сравнительный анализ методов повышения надежности тепловых сетей на основе самодиагностики и предиктивного анализа. Рассмотрены методы цифрового мониторинга, обнаружения аномалий, FDD-диагностики подстанций, прогнозирования тепловой нагрузки, беспилотной инфракрасной диагностики и оптимизационного управления теплотреблением.

Пороговый контроль целесообразно применять только как базовый уровень, так как он прост и понятен, но не обеспечивает раннего выявления скрытых дефектов. ML-методы, такие как DBSCAN, Isolation Forest и автоэнкодеры, более перспективны для самодиагностики, поскольку способны выявлять нетипичные режимы по многомерным данным. Для тепловых подстанций наиболее сильные результаты показывает FDD-подход: точность нормального режима 98 %, $F0.5 = 83$ %, раннее выявление 60 % дефектов за 3-5 дней до обращения потребителя [3].

Для прогнозирования нагрузки наиболее эффективной является гибридная модель BiLSTM-TCN, которая обеспечивает MAPE 2,47 % [5]. Для управления теплотреблением перспективен подход transformer + DQN, обеспечивающий экономию энергии 7,40-14,85 %, а в отдельные периоды более 20 % [4]. Термoeкономические исследования показывают, что конструктивная схема сети также влияет на устойчивость: CO₂-геотермальная сеть может снизить LCOH примерно на 23,8 % [6].

На основании сравнения рекомендуется гибридная система самодиагностики и предиктивного анализа. Она должна объединять сбор данных SCADA, прогноз нагрузки, обнаружение аномалий, FDD-диагностику и оптимизационное управление. Такой вариант является наиболее рациональным для темы исследования, потому что одновременно обеспечивает раннее предупреждение дефектов, снижение ошибки управления, экономию энергии и переход от аварийного ремонта к обслуживанию по фактическому состоянию.

Конфликт интересов. Корреспондент автор заявляет, что конфликта интересов нет.

Ссылка на данную статью: Салихова С.Б., Ниетбай С.Е. Исследование надежности современных вентилируемых фасадов для зданий гражданского назначения // Вестник Казахского автомобильно-дорожного института = Bulletin of Kazakh Automobile and Road Institute = Kazakh avtomobil-zhol institutynyn Khabarshysy. 2026; 2 (14): 54-67. <https://doi.org/10.63377/3005-4966.2-2026-02>

Cite this article as: Salikhova S., Nietbay S.E. Study of the Reliability of Modern Ventilated Facades for Civil Buildings [Thermal characteristics of floors on ground when using innovative insulation materials]. Vestnik Kazahskogo avtomobil'no-dorozhnogo instituta = Bulletin of Kazakh Automobile and Road Institute = Kazakh avtomobil-zhol institutynyn Khabarshysy. 2026; 2 (14): 54-67. <https://doi.org/10.63377/3005-4966.2-2026-02>

Литература

1. Утепбергенов, И. Т., Сейтбекова, А. М., & Абжанова, Л. К. (2025). Применение искусственного интеллекта для перехода к проактивной модели управления тепловыми сетями. *Вестник Торайгыров университета. Энергетическая серия*, (3). <https://doi.org/10.48081/TAXG1964>

2. Barzegaran Hosseini, P., Mohammadpourfard, M., Gokcen Akkurt, G., & Mohammadpourfard, M. (2025). A smart approach to maintenance of sustainable district heating systems: Techniques, challenges, and future directions. *Measurement: Energy*, 8, Article 100064. <https://doi.org/10.1016/j.meaeene.2025.100064>
3. Roelofs, C. M. A., Guevara Bastidas, E., Hugo, T., Faulstich, S., & Cadenbach, A. (2026). Enabling predictive maintenance in district heating substations: A labelled dataset and fault detection evaluation framework based on service data. *Energy*, 355, Article 141178. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2026.141178>
4. Kalidindi, S. S. V., Banaee, H., Karlsson, H., & Loutfi, A. (2025). District heating optimization in residential buildings using reinforcement learning with adaptive context-aware predictive environment. *Energy and AI*, 22, Article 100603. <https://doi.org/10.1016/j.egyai.2025.100603>
5. Song, J., Li, W., Zhu, S., Zhou, C., Xue, G., & Wu, X. (2024). Predicting hourly heating load in district heating system based on the hybrid Bi-directional long short-term memory and temporal convolutional network model. *Journal of Cleaner Production*, 463, Article 142769. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142769>
6. Fiaschi, D., Ungar, P., Gigliotti, F., & Meana-Fernandez, A. (2025). Thermo-economic analysis of a geothermal-driven district heating network: Comparison between a water-based and a CO₂-based grid. *Applied Thermal Engineering*, 281, Article 128794. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.128794>
7. Pans, M. A., Claudio, G., & Eames, P. C. (2025). Transition pathways for a gas supplied district heating network to an ultra low carbon district heating network: A case study for Holywell Park, Loughborough University. *Renewable Energy*, 255, Article 123841. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.123841>
8. Bibiloni-Mulet, P. A., Diaz Torres, Y., Alonso, I., Vidal-Noguera, J., Moia-Pol, A., Canals, V., Mestre-Sanso, F., & Martinez-Moll, V. (2026). Management of the part-load operation of a heat pump-based low enthalpy district heating and cooling network in a university campus with photovoltaic generation. *Energy*, 351, Article 140849. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2026.140849>
9. Lund, H., Werner, S., Wiltshire, R., Svendsen, S., Thorsen, J. E., Hvelplund, F., & Mathiesen, B. V. (2014). 4th Generation District Heating (4GDH): Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems. *Energy*, 68, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.02.089>
10. Gadd, H., & Werner, S. (2015). Fault detection in district heating substations. *Applied Energy*, 157, 51–59. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.07.061>
11. Ostergaard, D. S., Smith, K. M., Tunzi, M., & Svendsen, S. (2022). Low-temperature operation of heating systems to enable 4th generation district heating: A review. *Energy*, 248, Article 123529. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123529>
12. Neumayer, M., Stecher, D., Grimm, S., Maier, A., Buckner, D., & Schmidt, J. (2023). Fault and anomaly detection in district heating substations: A survey on methodology and data sets. *Energy*, 276, Article 127569. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127569>
13. Рамазан, Қ. Қ., & Ниятбай, С. Е. (2025). Теплотехнические особенности полов по грунту при использовании инновационных утеплителей. *Вестник Казахского автомобильно-дорожного института*, 3(11). <https://doi.org/10.63377/3005-4966.3-2025-01>
14. Niyetbay, S., Sadykbek, A. K., & Abiyeva, G. (2025). Современные подходы к обеспечению теплового и температурного режима производственных помещений с использованием инфракрасного отопления. *Техника ғылымдары және технология*, 1(9). <https://doi.org/10.52081/tst.2025.v02.i10.055>
15. Abiyeva, G., Niyetbay, S., Zhanguzhinov, A., Kassabekova, G., Jartayeva, D., Alimova, K., Zhakapbayeva, G., & Bostandyk, K. (2025). Impact of airflow disturbance from human

motion on contaminant control in cleanroom environments: A CFD-based analysis. *Buildings*, 15(13), Article 2264. <https://doi.org/10.3390/buildings15132264>

References

1. Utepbergenov, I. T., Seitbekova, A. M., & Abzhanova, L. K. (2025). *Primenenie iskusstvennogo intellekta dlya perekhoda k proaktivnoy modeli upravleniya teplovymi setyami* [Application of artificial intelligence for the transition to a proactive management model of district heating networks]. *Bulletin of Toraighyrov University. Energy Series*, (3). <https://doi.org/10.48081/TAXG1964>
2. Barzegaran Hosseini, P., Mohammadpourfard, M., Gokcen Akkurt, G., & Mohammadpourfard, M. (2025). A smart approach to maintenance of sustainable district heating systems: Techniques, challenges, and future directions. *Measurement: Energy*, 8, Article 100064. <https://doi.org/10.1016/j.meaeene.2025.100064>
3. Roelofs, C. M. A., Guevara Bastidas, E., Hugo, T., Faulstich, S., & Cadenbach, A. (2026). Enabling predictive maintenance in district heating substations: A labelled dataset and fault detection evaluation framework based on service data. *Energy*, 355, Article 141178. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2026.141178>
4. Kalidindi, S. S. V., Banaee, H., Karlsson, H., & Loutfi, A. (2025). District heating optimization in residential buildings using reinforcement learning with adaptive context-aware predictive environment. *Energy and AI*, 22, Article 100603. <https://doi.org/10.1016/j.egyai.2025.100603>
5. Song, J., Li, W., Zhu, S., Zhou, C., Xue, G., & Wu, X. (2024). Predicting hourly heating load in district heating system based on the hybrid bi-directional long short-term memory and temporal convolutional network model. *Journal of Cleaner Production*, 463, Article 142769. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142769>
6. Fiaschi, D., Ungar, P., Gigliotti, F., & Meana-Fernandez, A. (2025). Thermo-economic analysis of a geothermal-driven district heating network: Comparison between a water-based and a CO₂-based grid. *Applied Thermal Engineering*, 281, Article 128794. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.128794>
7. Pans, M. A., Claudio, G., & Eames, P. C. (2025). Transition pathways for a gas supplied district heating network to an ultra low carbon district heating network: A case study for Holywell Park, Loughborough University. *Renewable Energy*, 255, Article 123841. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.123841>
8. Bibiloni-Mulet, P. A., Diaz Torres, Y., Alonso, I., Vidal-Noguera, J., Moia-Pol, A., Canals, V., Mestre-Sanso, F., & Martinez-Moll, V. (2026). Management of the part-load operation of a heat pump-based low enthalpy district heating and cooling network in a university campus with photovoltaic generation. *Energy*, 351, Article 140849. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2026.140849>
9. Lund, H., Werner, S., Wiltshire, R., Svendsen, S., Thorsen, J. E., Hvelplund, F., & Mathiesen, B. V. (2014). 4th Generation District Heating (4GDH): Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems. *Energy*, 68, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.02.089>
10. Gadd, H., & Werner, S. (2015). Fault detection in district heating substations. *Applied Energy*, 157, 51–59. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.07.061>
11. Ostergaard, D. S., Smith, K. M., Tunzi, M., & Svendsen, S. (2022). Low-temperature operation of heating systems to enable 4th generation district heating: A review. *Energy*, 248, Article 123529. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123529>

12. Neumayer, M., Stecher, D., Grimm, S., Maier, A., Bucker, D., & Schmidt, J. (2023). Fault and anomaly detection in district heating substations: A survey on methodology and data sets. *Energy*, 276, Article 127569. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127569>
13. Ramazan, K. K., & Niyetbay, S. E. (2025). *Teplotekhnicheskie osobennosti polov po gruntu pri ispol'zovanii innovatsionnykh uteplitelei* [Thermotechnical features of floors on ground when using innovative insulation materials]. *Bulletin of Kazakh Automobile and Road Institute*, (3(11)). <https://doi.org/10.63377/3005-4966.3-2025-01>
14. Niyetbay, S., Sadykbek, A. K., & Abiyeva, G. (2025). Modern approaches to ensuring thermal and temperature conditions of industrial premises using infrared heating. *Technical Sciences and Technology*, (1(9)). <https://doi.org/10.52081/tst.2025.v02.i10.055>
15. Abiyeva, G., Niyetbay, S., Zhanguzhinov, A., Kassabekova, G., Jartayeva, D., Alimova, K., Zhakapbayeva, G., & Bostandyk, K. (2025). Impact of airflow disturbance from human motion on contaminant control in cleanroom environments: A CFD-based analysis. *Buildings*, 15(13), Article 2264. <https://doi.org/10.3390/buildings15132264>