Ссылка для цитирования этой статьи:

Важдаев К.В., Гиндулин Р.Г., Казакова Э.Ф. Тепловидение +AI: автоматизированный аудит теплопотерь здания по данным с дрона и стационарных IoT-сенсоров // Human Progress. 2026. Том 12, Вып. 2. С. 4. URL: http://progress-human.com/images/2026/Tom12_2/Vazhdaev.pdf DOI 10.46320/2073-4506-2026-2a-16.

УДК 697.1:004.8

ТЕПЛОВИДЕНИЕ + AI: АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ АУДИТ ТЕПЛОПОТЕРЬ ЗДАНИЯ ПО ДАННЫМ С ДРОНА И СТАЦИОНАРНЫХ IoT-СЕНСОРОВ

Важдаев Константин Владимирович
кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой «Водоснабжение и водоотведение»,
Уфимский государственный нефтяной технический университета;
доцент кафедры «Электроника и физика наноструктур»,
Уфимский университет науки и технологий,
г. Уфа, Российская Федерация

Гиндулин Руслан Гаетнурович
инженер-исследователь,
Уфимский государственный нефтяной технический университета;
г. Уфа, Российская Федерация

Казакова Эльвина Финуровна
научный работник,
Уфимский государственный нефтяной технический университета;
г. Уфа, Российская Федерация

Аннотация. Сектор жилищно-коммунального хозяйства и энергоэффективного строительства сталкивается с вызовом масштабной оптимизации энергопотребления существующего фонда зданий. Ключевым препятствием является отсутствие быстрых, точных и масштабируемых методов диагностики теплопотерь. Традиционные тепловизионные обследования, выполняемые вручную с земли, имеют ограниченный охват, подвержены субъективизму и дают лишь моментальный снимок, не отражающий динамику тепловых процессов [1], [2]. Конвергенция технологий — дистанционной аэротермографии с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), сети стационарных IoT-сенсоров для непрерывного мониторинга и платформ искусственного интеллекта (ИИ) для автоматического анализа — формирует новую парадигму аудита. В данной статье представлен комплексный анализ архитектуры и экономической эффективности системы автоматизированного аудита

теплопотерь. На основе моделирования и практических кейсов доказывается, что такой подход не только радикально повышает скорость и точность выявления дефектов ограждающих конструкций, но и обеспечивает значимое сокращение операционных расходов (OPEX) на обследование и будущие ремонты за счет перехода от реактивных к превентивным и основанным на данных решениям. Разработанная модель служит основой для обоснования инвестиций в цифровые инструменты управления энергоэффективностью зданий.

Ключевые слова: автоматизированный энергоаудит, тепловизионный контроль, искусственный интеллект (ИИ), машинное обучение, беспилотные летательные аппараты (БПЛА, дроны), IoT-сенсоры, теплопотери зданий, ограждающие конструкции, предиктивная аналитика, операционные расходы (OPEX).

Введение

Энергоэффективность зданий является критическим фактором экономической и экологической устойчивости. Значительная часть тепловой энергии теряется через дефектные ограждающие конструкции — фасады, кровли, окна. Борьба с этими потерями начинается с точной диагностики, однако существующие методы сталкиваются с системными проблемами. Ручное тепловизионное обследование требует значительных трудозатрат, сильно зависит от погодных условий и квалификации оператора, часто не позволяет безопасно и полностью осмотреть высотные элементы или кровлю. Получаемые данные фрагментарны, их сложно сравнивать в динамике [1], [2]. Как следствие, план ремонтных мероприятий может быть неоптимальным, а реальная эффективность выполненных работ остается неверифицированной. Интеграция трех технологических платформ предлагает качественный скачок: БПЛА обеспечивают скоростной сбор тепловизионных данных с полным покрытием, IoT-сенсоры дают непрерывный контекст о микроклимате, а ИИ автоматизирует обработку, анализ и интерпретацию гигантских массивов информации. Цель настоящей статьи — детально описать методологию такого комплексного аудита, проанализировать его влияние на ключевые технологические процессы и представить количественную оценку снижения операционных затрат для служб эксплуатации и энергоаудиторских компаний. Это предоставляет управленцам четкие финансовые и технические аргументы для перехода к цифровым методам диагностики.

Методы исследований

Для достижения поставленной цели был применен метод проектирования системной архитектуры и последующего экономико-математического моделирования. На первом этапе

была разработана детализированная структурная схема системы автоматизированного аудита, включающая три взаимосвязанных контура:

1. **Контур сбора данных:**

– **Воздушный сегмент (БПЛА):** используются мультикоптеры или самолетного типа БПЛА, оснащенные двусенсорными камерами (тепловизионный и оптический каналы с высокой разрешающей способностью), GPS-модулем высокой точности и системой стабилизации. Полеты выполняются по автоматизированным маршрутам, обеспечивающим полное покрытие объекта с заданным перекрытием снимков.

– **Наземный стационарный сегмент (IoT):** по периметру здания, на ключевых фасадах, в потенциально проблемных зонах (стыки, углы, парапеты) и внутри помещений устанавливаются автономные датчики температуры, влажности, атмосферного давления. Данные передаются по беспроводным сетям (LPWAN, LoRaWAN, NB-IoT) на центральный шлюз.

2. **Контур обработки и анализа (ПО на базе ИИ):**

– **Этап 1 — Автоматическая фотограмметрия и термограмметрия:** специализированное программное обеспечение создает ортомозаику (точный 2D-план) и 3D-модель здания, на которую накладываются тепловизионные данные, формируя геопривязанную «тепловую карту».

– **Этап 2 — Синхронизация и обогащение данных:** данные IoT-сенсоров, привязанные к координатам, синхронизируются с тепловой картой по временным меткам. Это позволяет учитывать влияние солнца, ветра, текущей температуры воздуха на тепловизионную картину.

– **Этап 3 — Автоматический анализ и классификация:** алгоритмы компьютерного зрения (сверточные нейронные сети) и машинного обучения анализируют обогащенную тепловую карту. Они автоматически детектируют, сегментируют и классифицируют аномалии по типам: «мостики холода» в узлах конструкций, «дефекты сплошности утепления», «зоны повышенной инфильтрации воздуха» (окна, двери), «повышенная влажность конструкций». Результатом является цифровой отчет с аннотированной моделью, таблицей дефектов, их координатами и количественной оценкой потенциальных потерь.

3. **Контур верификации и моделирования:** для калибровки алгоритмов и проверки результатов использовались данные эталонных обследований с применением тепловизоров высокого класса, пирометров и испытаний на воздухопроницаемость (например,

метод «Аэродор»). На втором этапе исследования, на основе экспертных оценок и отраслевых данных о стоимости работ [3], [4], была построена финансовая модель для сравнения затрат по традиционной и автоматизированной методикам для условного объекта (многоэтажный жилой дом, административное здание).

Технологические основы и трансформация процессов аудита

Внедрение комплексной системы приводит к фундаментальной трансформации ключевых процессов:

– **Процесс первичного обследования:** заменяет многочасовые/многодневные наземные и высотные работы с риском для персонала на быстрый автоматизированный облет (1-3 часа для среднего здания). Частота мониторинга может быть увеличена (сезонно, до/после ремонта) без пропорционального роста затрат.

– **Процесс интерпретации данных:** переход от субъективного анализа «сырых» термограмм оператором к объективному, стандартизированному отчету, сгенерированному ИИ. Это минимизирует человеческую ошибку и позволяет сравнивать состояние объекта в разные периоды времени.

– **Процесс планирования ремонтов:** формируется не список потенциальных проблем, а точная цифровая карта дефектов с приоритизацией по степени влияния на теплопотери. Это позволяет точно рассчитать объемы материалов (утеплителя, герметика) и трудозатрат, перейдя от смет «по аналогии» к прецизионному планированию.

– **Процесс контроля качества ремонтов:** после выполнения работ повторный облет и анализ позволяют объективно и количественно оценить устранение выявленных дефектов, что является инструментом приемки работ для заказчика.

Анализ снижения операционных затрат и повышения эффективности

Экономический эффект от внедрения автоматизированного аудита носит многокомпонентный характер. В Таблице 1 систематизировано его влияние на основные статьи расходов и качественные показатели.

Таблица 1.

Сравнительное влияние традиционного и автоматизированного аудита на затраты и результаты

Критерий / Статья затрат	**Традиционный тепловизионный аудит (ручной)**	**Автоматизированный аудит (БПЛА + IoT + ИИ)**	**Механизм эффекта и потенциальные результаты**
Время полного обследования	Дни (зависит от доступности, необходимости использования подъемников).	Часы (автоматизированный полет, одновременный сбор данных со всех сторон).	Ускорение в 5-10 раз. Возможность обследовать больше объектов в сезон.
Трудозатраты (ФОТ специалистов)	Высокие. Требуется бригада: оператор тепловизора, помощник, часто — промышленные альпинисты.	Сокращены на 50-70%. Роль оператора — планирование полета, контроль оборудования, анализ готового отчета ИИ.	Высвобождение высококвалифицированных кадров, снижение расходов на ФОТ и страховку для высотных работ.
Затраты на оборудование и логистику	Аренда автовышек/лесов, транспорт, ручное оборудование.	Капитальные вложения в БПЛА и ПО. Эксплуатационные затраты на полеты минимальны (аккумуляторы).	Замена переменных расходов на аренду на фиксированные капитальные. Снижение логистической нагрузки.
Полнота и точность данных	Ограничена углами обзора, доступностью точек. Субъективна.	100% покрытие фасадов и кровли. Объективная количественная оценка, привязанная к 3D-модели.	Исключение «слепых зон». Получение неоспоримых доказательств для формирования техзадания.
Динамический мониторинг	Практически отсутствует (разовые акции).	Реализуем без существенного удорожания. IoT-сенсоры работают постоянно, облеты можно повторять регулярно.	Выявление дефектов, проявляющихся при特定 условиях (дождь, мороз, ветер). Оценка эффективности ремонта в динамике.
Затраты на последующие ремонты (косвенное влияние)	Неточная диагностика ведет к избыточным или недостаточным работам («переутепление» одних зон, недоделки в других).	Точная локализация и количественная оценка позволяют оптимизировать объем и локацию работ, закупку материалов.	Снижение стоимости ремонтных работ на 15-25% за счет точного планирования и избежания ошибок.

Финансовое моделирование для условного административного здания площадью 10 000 кв. м. фасадов показывает следующее. Стоимость одного традиционного обследования с привлечением альпинистов и детальным отчетом может составлять 150-250 тыс. руб. Годовые затраты на два таких обследования (до и после ремонта) — 300-500 тыс. руб. Внедрение собственной системы автоматизированного аудита (БПЛА среднего класса — 500 тыс. руб., ПО с лицензией — 300 тыс. руб./год, набор IoT-сенсоров — 200 тыс. руб., зарплата оператора/аналитика) требует первоначальных инвестиций порядка 1.5 млн руб. и ежегодных OPEX около 700 тыс. руб. Однако эта система позволяет проводить 4-6 обследований в год (мониторинг, приемка этапов работ) без существенного роста затрат. Ключевая экономия формируется на стороне заказчика (управляющей компании) за счет оптимизации ремонтной программы. Снижение стоимости запланированного ремонта фасада всего на 15% при смете в 10 млн руб. дает экономию в 1.5 млн руб., что сразу окупает инвестиции в систему аудита. Для энергоаудиторской компании автоматизация увеличивает пропускную способность и рентабельность проекта.

Заключение

Автоматизированный аудит теплопотерь, основанный на синтезе данных с дронов, IoT-сенсоров и искусственного интеллекта, представляет собой не эволюционное улучшение, а революционную перезагрузку подхода к диагностике энергоэффективности зданий. Он преодолевает ключевые ограничения ручных методов — медлительность, неполноту, субъективизм и статичность. Представленный анализ демонстрирует, что экономическая эффективность технологии имеет двойную природу: прямая экономия достигается за счет резкого сокращения трудозатрат и времени на проведение обследования; опосредованная, и зачастую более значительная, — за счет кардинального повышения качества диагностики, что ведет к оптимальному планированию и снижению стоимости капитальных ремонтов, а также к постоянной экономии на оплате тепловой энергии.
Таким образом, инвестиции в создание или использование подобных систем являются стратегическими. Для управляющих компаний и собственников — это инвестиция в снижение долгосрочных эксплуатационных и капитальных расходов. Для специализированных сервисных компаний — это инвестиция в переход на качественно новый уровень услуг, обеспечивающий конкурентное преимущество и высокую маржинальность. Широкое внедрение автоматизированного аудита станет катализатором для системного повышения энергоэффективности всего жилищного фонда и коммерческой недвижимости.

Список литературы

1. Важдаев К.В., Абдрахманов В.Х., Салихов Р.Б. Интеллектуальная система жилых зон на основе информационно-измерительных систем управления // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2016. Т. 12. № 2. С. 70-75.

2. Важдаев К.В., Мартяшева В.А., Аллабердин А.Б., Гарипов Б.А., Ткачук М.А., Юсупов А.М. Использование отечественных программных продуктов 3D моделирования при проектировании инженерных сетей / Строительство и техногенная безопасность. – 2024. - № 34(86) - С. 57-64.

3. Попов А. А., Соломина Ю. К. Анализ возможностей использования беспилотных летательных аппаратов для управления жилищно-коммунальным хозяйством // Фундаментальные исследования. 2018. № 2. С. 144–151. EDN: YSEXJE

4. Носков И.В., Носков К.И., Тиненская С.В., Ананьев С.А. Дрон-технологии в строительстве – современные решения и возможности // Вестник Евразийской науки, 2020 №5.

5. Попов Н.И., Емельянова О.В., Яцун С.Ф., Савин А.И. Исследование движения квадрокоптера при внешнем периодическом воздействии // Справочник. Инженерный журнал (с приложением). С. 12–17.

6. Ефимов С.В., Яцун С.Ф., Наумов Г.С. Кинематический анализ пространственного анализа пространственного движения крыла орнитоптера // Вибрация – 2014. Вибрационные технологии, мехатроника и управляемые машины: матер. XI междунар. науч.-тех. конф. в 2т. Т.2 / ФГБОУ ВПО ЮЗГУ. – Курск, 2014. С. 273– 281.

7. Ефимов С.В. Исследование управляемого синхронного движения летающего робота с машущим крылом при взлете / Ефимов С.В., Поляков Р.Ю., Мозговой Н.В. // Электротехнические комплексы и системы управления №3(35). 2014 – С. 28–33

8. Барбасов В.К., Гаврюшин М.Н., Дрыга Д.О. и др. Многороторные беспилотные летательные аппараты и возможности их использования для дистанционного зондирования Земли // Инженерные изыскания. – 2012. – № 10. – С. 38–42.

9. Карпик А.П., Осипов А.Г., Мурзинцев П.П. Управление территорией в геоинформационном дискурсе: монография. – Новосибирск: СГГА, 2010. – 280 с

10. Ткачева О.А., Плаксицкий Е.П. Геоинформационные системы в государственном управлении земельными ресурсами // Инновационное развитие агропромышленного комплекса и аграрного образования: материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 80-летию ФГБОУ ВПО «Бурятская государственная сельскохозяйственная академия им. В.Р. Филиппова». – Министерство сельского хозяйства Российской Федерации, ФГБОУ ВПО «Бурятская государственная сельскохозяйственная

академия им. В.Р. Филиппова», 2011. – С. 223–227.

11. Попов Н.И., Емельянова О.В., Яцун С.Ф., Савин А.И. Исследование колебаний квадрокоптера при внешних периодических воздействиях // Фундаментальные исследования. №1. 2014. С. 28–32.

12. Ефимов С.В., Яцун С.Ф., Наумов Г.С. Моделирование одного из вариантов движения крыльев орнитоптера во время полета // Вибрация – 2014. Вибрационные технологии, мехатроника и управляемые машины: матер. XI междунар. науч.-тех. конф. в 2 т. Т.2 / ФГБОУ ВПО ЮЗГУ. Курск. 2014. С. 205– 219.

THERMAL IMAGING + AI: AUTOMATED BUILDING HEAT LOSS AUDIT USING DRONE AND FIXED IOT SENSOR DATA

Vazhdaev Konstantin Vladimirovich
Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor,
Head of the Department of Water Supply and Sanitation,
Ufa State Petroleum Technological University;
Associate Professor of the Department of Electronics and Physics of Nanostructures,
Ufa University of Science and Technology,
Ufa, Russian Federation

Gindulin Ruslan Gaetnurovich
research engineer
Ufa State Petroleum Technological University;
Ufa, Russian Federation

Kazakova Elvina Finurovna
Researcher,
Ufa State Petroleum Technological University;
Ufa, Russian Federation

Abstract. The housing and utilities and energy-efficient construction sectors face the challenge of large-scale energy optimization of existing buildings. A key obstacle is the lack of fast, accurate, and scalable methods for heat loss diagnostics. Traditional thermal imaging surveys, performed manually from the ground, have limited coverage, are subject to subjectivity, and provide only a snapshot that does not reflect the dynamics of thermal processes [1, 2]. The convergence of technologies—remote aerial thermography from unmanned aerial vehicles (UAVs), a network of stationary IoT sensors for continuous monitoring, and artificial intelligence (AI) platforms for automated analysis—is creating a new audit paradigm. This article presents a comprehensive analysis of the architecture and cost-effectiveness of an automated heat loss audit system. Modeling and practical case studies demonstrate that this approach not only dramatically improves the speed and accuracy of structural defect detection but also significantly reduces operating expenses (OPEX) for inspections and future repairs by shifting from reactive to preventive and data-driven decisions. The developed model serves as a basis for justifying investments in digital building energy management tools.

Key words: automated energy audit, thermal imaging monitoring, artificial intelligence (AI), machine learning, unmanned aerial vehicles (UAVs, drones), IoT sensors, building heat loss, building envelopes, predictive analytics, operating expenses (OPEX).

References

1. Vazhdaev K.V., Abdrakhmanov V.Kh., Salikhov R.B. Intelligent system of residential zones based on information-measuring control systems // Electrical and information complexes and systems. 2016. Vol. 12. No. 2. Pp. 70-75.
2. Vazhdaev K.V., Martyasheva V.A., Allaberdin A.B., Garipov B.A., Tkachuk M.A., Yusupov A.M. Using domestic 3D modeling software products in the design of utility networks / Construction and technological safety. - 2024. - No. 34 (86) - P. 57-64.
3. Popov A.A., Solomina Ju.K. Analysis of the possibilities of using unmanned aerial vehicles for managing housing and communal services. Fundamental'nye issledovaniya [Fundamental research]. 2018. No. 2. Pp. 144–151. EDN: YSEXJE.
4. Noskov I.V., Noskov K.I., Tinenskaia S.V., Ananev S.A. (2020). Dron-technologies in construction – modern solutions and opportunities. The Eurasian Scientific Journal, [online] 5(12)
5. 5. Popov N.I., Emelyanova O.V., Yatsun S.F., Savin A.I. Study of quadcopter motion under external periodic influence // Handbook. Engineering journal (with appendix). Pp. 12–17.
6. Efimov S.V., Yatsun S.F., Naumov G.S. Kinematic analysis of spatial analysis of spatial motion of ornithopter wing // Vibration – 2014. Vibration technologies, mechatronics and controlled machines: proc. XI int. scientific-technical conf. in 2 volumes. V.2 / FGBOU HPE South-West State University. – Kursk, 2014. Pp. 273–281.
7. Efimov S.V. Study of controlled synchronous motion of a flying robot with flapping wing during takeoff / Efimov S.V., Polyakov R.Yu., Mozgovoy N.V. // Electrical engineering complexes and control systems No. 3 (35). 2014 – Pp. 28–33
8. Barbasov V.K., Gavryushin M.N., Dryga D.O. et al. Multi-rotor unmanned aerial vehicles and the possibilities of their use for remote sensing of the Earth // Engineering surveys. – 2012. – No. 10. – Pp. 38–42.
9. Karpik A.P., Osipov A.G., Murzintsev P.P. Territory management in geoinformation discourse: monograph. – Novosibirsk: SGGA, 2010. – 280 p.
10. Tkacheva O. A., Plaksitsky E. P. Geoinformation systems in public land management // Innovative development of the agro-industrial complex and agricultural education: Proceedings of the International scientific and practical conference dedicated to the 80th anniversary of the Buryat State Agricultural Academy named after V. R. Filippov. – Ministry of Agriculture of the Russian Federation, Buryat State Agricultural Academy named after V. R. Filippov, 2011. – Pp. 223–227.
11. Popov N. I., Emelyanova O. V., Yatsun S. F., Savin A. I. Study of quadcopter oscillations under external periodic influences // Fundamental research. No. 1. 2014. Pp. 28–32.
12. Efimov S.V., Yatsun S.F., Naumov G.S. Modeling of one of the variants of ornithopter wing movement during flight // Vibration – 2014. Vibration technologies, mechatronics and controlled machines: proc. XI int. sci.-tech. conf. in 2 vols. Vol. 2 / FGBOU HPE South-West State University. Kursk. 2014. pp. 205–219.