

Обзорная статья

УДК 621.386

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.28402>



А.А. Синицын¹, И.Г. Ахметова², О.В. Соловьева² ✉

¹ Вологодский государственный университет,
г. Вологда, Россия;

² Казанский государственный энергетический университет,
Казань, Россия

✉ solovyeva.ov@kgeu.ru

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ ТЕПЛОВОЙ КОНТРОЛЬ КОНСТРУКТИВНО ИЗОЛИРОВАННОГО КОРПУСА

Аннотация. Требования, предъявляемые к современным конструкциям, для обеспечения энергоэффективности зданий, необходимо реализовывать с помощью точной диагностики ситуации до непосредственной модернизации здания. В этой работе описываются преимущества неразрушающего теплового контроля для оценки эксплуатационных характеристик зданий и разработки точных проектов энергетической модернизации для жилищного сектора. Инфракрасная диагностика позволяет быстро и качественно оценить эксплуатационные характеристики ограждающих конструкций зданий, выявлять зоны, в которых наблюдаются высокие тепловые потери, для их последующего устранения. В данной статье представлены технические особенности тепловизионной съемки ограждающей конструкции блочно-модульного многоквартирного жилого дома. Для оценки приоритетности мер по модернизации здания, с помощью тепловизионной съемки определяются зоны высоких теплопотерь и низкой эффективности изоляции. Исходя из актуальности и практической значимости строительной термографии при рассмотрении вопросов энергосбережения и энергоэффективности, авторы представили некоторые особенности и результаты внешней и внутренней термографии на примере жилого помещения в многоквартирном доме.

Ключевые слова: энергосбережение, модернизация здания, тепловое инфракрасное излучение, неразрушающий контроль, теплопотери.

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания №075-01262-22-01 от 28 января 2022 г. (Дополнительное соглашение 075-03-2022-151/1 с 31 января 2022 года).

Для цитирования:

Синицын А.А., Ахметова И.Г., Соловьева О.В. Неразрушающий тепловой контроль конструктивно изолированного корпуса // Глобальная энергия. 2022. Т. 28, № 4. С. 21–30. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.28402>



A.A. Sinitsin¹, I.G. Akhmetova², O.V. Soloveva² ✉

¹ Vologda State University, Vologda, Russia;

² Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

✉ solovyeva.ov@kgeu.ru

NON-DESTRUCTIVE THERMAL CONTROL OF A STRUCTURALLY INSULATED ENCLOSURE

Abstract. The requirements for modern structures to ensure the energy efficiency of buildings must be implemented through an accurate diagnosis of the situation before the actual modernization of the building. This paper describes the benefits of non-destructive thermal testing for evaluating building performance and designing accurate energy retrofit projects for the residential sector. Infrared diagnostics allows you to quickly and accurately assess the performance of building envelopes, identify areas where high heat losses are observed for their subsequent elimination. This article presents the technical features of thermal imaging of the building envelope of a block-modular multi-apartment residential building. To prioritize building modernization measures, thermal imaging identifies areas of high heat loss and low insulation efficiency. Based on the relevance and practical significance of building thermography when considering issues of energy saving and energy efficiency, the authors presented some features and results of external and internal thermography using the example of a dwelling in an apartment building.

Keywords: energy saving, building modernization, thermal infrared radiation, non-destructive testing, heat loss.

Acknowledgements: The study was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of state task No. 075-01262-22-01 dated January 28, 2022 (Additional agreement 075-03-2022-151/1 dated January 31, 2022).

Citation:

A.A. Sinitsin, I.G. Akhmetova, O.V. Soloveva, Non-destructive thermal control of a structurally insulated enclosure, *Global Energy*, 28 (04) (2022) 21–30, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.28402>

Введение. Внедрение новых стандартов в области энергосбережения и повышения энергоэффективности является глобальной проблемой в течение последних 50 лет [1–3]. Валовой внешний продукт и экономика трех крупных государств, таких как Китай, Соединенные Штаты и Россия, в значительной степени основаны на потреблении невозобновляемых энергетических ресурсов. В частности, промышленный сектор и жилые здания Российской Федерации потребляют более половины всех энергоресурсов страны.

Чтобы минимизировать теплопотери в зданиях, были разработаны меры по повышению энергоэффективности [4–9]. Эти меры включают установку энергосберегающего профиля; оснащение помещений радиаторами с индивидуальной системой управления; создание непрерывного контура теплоизоляции; использование специализированных входных дверей с теплоизоляционным профилем, периодическое обследование зданий и сооружений, с использованием современного тепловизионного оборудования для обнаружения температурных аномалий и мостов.

В последние годы эксперты, работающие над вопросами энергосбережения и энергоэффективности, пришли к выводу, что наибольшее количество тепла теряется именно через ограждающие конструкции зданий и сооружений. Поскольку количество технологий для строительства

зданий ограничено, имеет смысл унифицировать методы, используемые для повышения энергосбережения зданий.

Тепловой неразрушающий контроль может быть использован для качественной и количественной оценки уровня тепловой защиты, энергосбережения и энергетической эффективности строительного объекта [10–12]. Тепловизионная съемка – это один из видов теплового неразрушающего контроля. Его преимущества заключаются в точности и надежности полученных результатов; тепловизионная съемка эффективна и универсальна, безопасна и позволяет проводить съемку на удаленном расстоянии от объекта исследования. Тепловизоры можно применять при низких температурах, а для высококачественной обработки термограмм имеются широкие возможности. Термография и тепловизионная съемка нашли широкое практическое применение не только в строительстве, но и в различных отраслях промышленности и производства: в энергетике, металлургии, машиностроении, транспорте, электроснабжении, теплоснабжении и электронике.

В Российской Федерации тепловая визуализация ограждающих конструкций зданий, а также инженерных систем регулируется несколькими нормативными документами^{1,2}. Однако существуют также общие правила и рекомендации. Тепловизионная съемка должна применяться ко всем элементам внешнего ограждения здания [13–17], т.е. стенам с внешними углами, промежуточным этажам, мансардным этажам или покрытиям; окнам, фрамугам и балконным дверям; эркерам, потолкам над проходами и т.д.

Обзор современной научной литературы [18–20] показывает, что среди методов неразрушающего контроля термоконтроль является наилучшим вариантом оценки не только теплозащитных свойств ограждающих конструкций капитального и завершенного строительства различного назначения, но и общего потенциала энергосбережения здания. Применение тепловизионного оборудования в строительстве уже вышло за рамки диагностики только ограждающих конструкций зданий и выявления теплотехнических дефектов. В настоящее время тепловизоры и сопутствующее оборудование активно используются при обследовании инженерных систем жизнеобеспечения и поиске мест расположения технических коммуникаций в стенах и потолках строительных объектов. Также можно выполнить тепловизионную диагностику систем отопления и теплоснабжения зданий.

Постановка задачи

Целью данной работы является тепловизионная диагностика жилой квартиры и выявление теплотехнических дефектов, составление рекомендаций по их устранению.

Материалы и методы

Тепловизионная диагностика была выполнена с помощью тепловизионной камеры Testo 875-2. Полученные данные были обработаны с помощью профессионального программного обеспечения Airsoft. При построении термограмм учитывались следующие параметры тепловизионного изображения: температура воздуха (t , °C), относительная влажность воздуха (ϕ , %), расстояние между линзой устройства и поверхностью исследуемого объекта (R , m), коэффициент излучения материала поверхности объекта ε (взято из справочных данных).

Тепловизионная съемка наружных ограждающих конструкций квартиры была проведена в холодное время года в естественных условиях 21 января 2021 года. Наружная тепловизионная съемка началась в 10 часов утра; внутренняя тепловизионная съемка началась в 11 часов утра были обследованы следующие строительные объекты: стеновые панели, вертикальные и горизонтальные стыки стен, угловые соединения, места примыкания стен к межэтажным перекрытиям.

¹ Национальный стандарт РФ ГОСТ Р 54852-2011 "Здания и сооружения. Метод тепловизионного контроля качества теплоизоляции ограждающих конструкций", М., 2011, 19 с.

² ISO 6781-1983 Thermal Insulation – Qualitative Detection of Thermal Irregularities in Building Envelopes – Infrared Method.

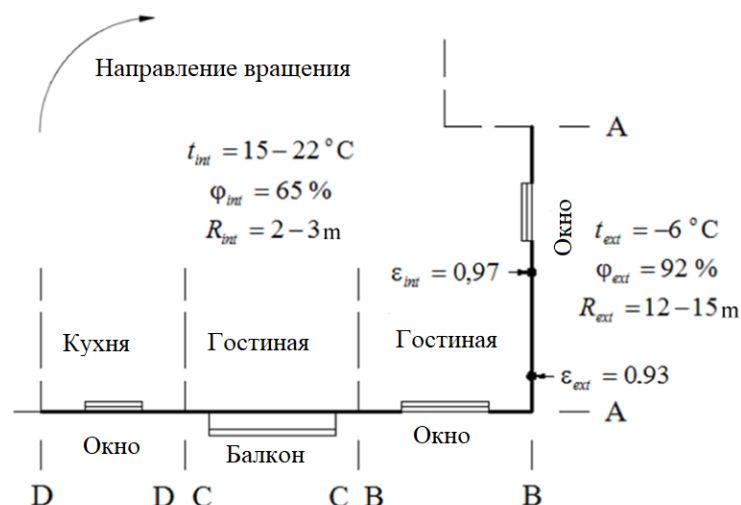


Рис. 1. Принципиальная схема и несколько параметров теплового неразрушающего контроля квартиры:
A – A, B – B, C – C, D – D являются характерными участками (срезами) объекта исследования

Fig. 1. Schematic diagram and several parameters of thermal non-destructive testing of an apartment:
A – A, B – B, C – C, D – D are characteristic sections (slices) of the object of study

Эксперименты проводились в г. Вологда, Российская Федерация. Полномасштабная проверка объекта проводилась при отрицательных наружных температурах и положительных внутренних температурах, при отсутствии осадков, тумана, солнечных бликов и других подобных природных явлений. Погодные условия соответствовали требованиям тепловизионного мониторинга.

Внешняя тепловизионная съемка проводилась при следующих условиях: $t_{\text{ext}} = -6^{\circ}\text{C}$, $\phi_{\text{ext}} = 92\%$, $R_{\text{ext}} = 12-15\text{ м}$, $\epsilon_{\text{ext}} = 0,93$ (цементно-песчаный раствор). Внутренняя тепловизионная съемка проводилась при следующих условиях: $t_{\text{int}} = 15-22^{\circ}\text{C}$, $\phi_{\text{int}} = 65\%$, $R_{\text{int}} = 2-3\text{ м}$, $\epsilon_{\text{int}} = 0,97$ (обои, штукатурка, лакокрасочное покрытие).

Термография наружных ограждающих конструкций проводилась в перпендикулярном направлении к поверхности обследуемого объекта или с отклонением от этого направления, не превышающим 30° угла наклона к горизонтальной плоскости. Тепловизионное изображение было реализовано в виде общего панорамного изображения, охватывающего всю внешнюю поверхность ограждающей конструкции с вертикальными и горизонтальными швами. Обследование проводилось последовательно вдоль обозначенных участков с покадровой записью термограмм в энергонезависимой памяти тепловизора.

На рис. 1 показана принципиальная схема теплового неразрушающего контроля квартиры. Результаты тепловизионной съемки представлены в табл. 1.

Результаты

В табл. 1 приведены результаты локальной тепловизионной съемки ограждающих конструкций квартиры в блочно-модульном панельном многоквартирном доме.


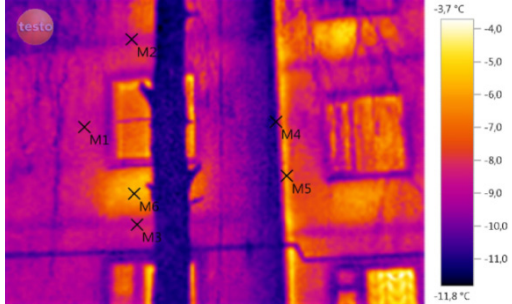

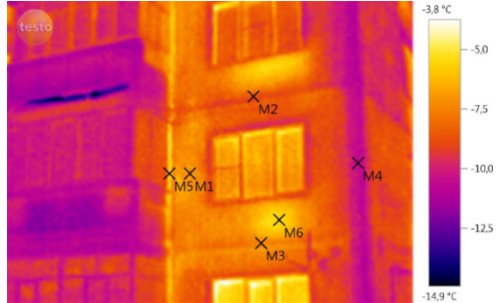

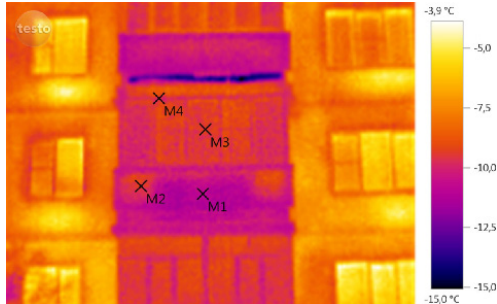
Проанализировав данные из табл. 1, мы сформулировали перечень выводов и рекомендаций по устранению выявленных теплотехнических дефектов. Внешняя тепловизионная съемка. На кадрах №1 (М2 – М4), №2 (М2 – М4) и №4 (М2) показано, что горизонтальные и вертикальные межэтажные перекрытия ограждающих конструкций обследованного объекта однородны по температурному полю и не содержат тепловых дефектов. Никаких тепловых дефектов в стеновых панелях, показанных на кадрах №1 (М1), №2 (М1) и №4 (М1), обнаружено не было. Анализ термограмм показал, что для участков №1 (М1), №2 (М1) и №4 (М1) температура поверхности сое-


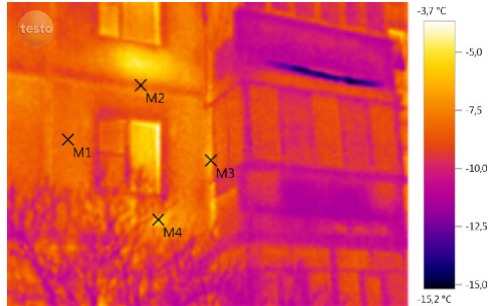



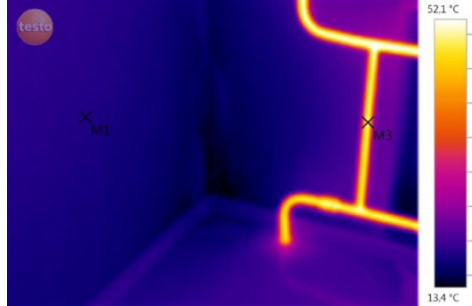
Таблица 1

Локальная тепловизионная съемка ограждающих конструкций квартиры
в блочно-модульном панельном многоквартирном доме

Table 1

Local thermal imaging of the enclosing structures of an apartment
in a block-modular panel apartment building

Участок	Фотография обследованного участка	Термограмма исследуемого участка
Внешняя тепловизионная съемка		
A–A		
<p>Участок No.1 M1: -8.4°C; M2: -8.9°C; M3: -8.7°C; M4: -10.9°C; M5: -6.2°C; M6: -5.7°C. M1, M2, M3, M4: никаких дефектов; M5: мостик холода в области вертикального стыка панельных плит (внешняя теплоизоляция с использованием напыляемого пенополиуретана с защитным покрытием и (или) термолаской); M6: чрезмерные потери тепла в области ниши нагревателя.</p>		
B–B		
<p>Участок No.2 M1: -7.2°C; M2: -8.5°C; M3: -7.5°C; M4: -10.5°C; M5: -5.3°C; M6: -5.4°C. M1, M2, M3, M4: никаких дефектов; M5: мостик холода в области вертикального стыка панельных плит (внешняя теплоизоляция с использованием напыляемого пенополиуретана с защитным покрытием и (или) термолаской); M6: чрезмерные потери тепла в области ниши обогревателя.</p>		
C–C		

	<p>Участок No.3 M1: -11.0°C; M2: -9.2°C; M3: -9.5°C; M4: -9.8°C. M1, M3, M4: никаких дефектов; M2: незначительный мостик холода (установка теплоизоляционных плит или панелей для балконов и лоджий, например, из пенополиуретана или минеральной ваты).</p>	
D-D		
	<p>Участок No.4 M1: -8.0°C; M2: -8.0°C; M3: -6.4°C; M4: -5.9°C. M1, M2: никаких дефектов; M3: мостик холода в области вертикального стыка панельных плит (внешняя теплоизоляция с использованием напыляемого пенополиуретана с защитным покрытием и (или) термокраской); M4: чрезмерные потери тепла в области ниши нагревателя.</p>	
LR		
	<p>Участок No.5 M1: 19.4°C; M2: 17.3°C; M3: 18.7°C; M4: 18.0°C; M5: 48.9°C. M1, M3, M4: никаких дефектов; M2: низкая температура поверхностного излучения; M5: потери тепла в помещение через трубы системы водяного отопления.</p>	
		
	<p>Участок No.6 M1: 18.1°C; M2: 13.7°C; M3: 49.4°C. M1: никаких дефектов; M2: Область возможного образования конденсата (температура точки росы $t_{\text{dew}} = 14.2^{\circ}\text{C}$); M3: потери тепла в помещение через трубы системы водяного отопления.</p>	

динения в среднем ниже температуры самих панелей на 0,1–0,5°C. Также видно, что для участков №1 (М5), №2 (М5) и №4 (М3) вертикальные швы недостаточно герметичны, и поэтому их уровень тепловой защиты сравнительно ниже.

Области максимальных теплопотерь в подоконных зонах помещения четко прослеживаются на участках №1 (М6), №2 (М6) и №4 (М4), что можно объяснить существующей компоновкой отопительных приборов в жилом здании. На участке №3 (М2) также был обнаружен незначительный мостик холода из-за низкого уровня тепловой защиты этой области ограждающей конструкции.

Внутреннее тепловизионное изображение. Сравнительный анализ внешних и внутренних тепловизионных изображений контролируемого объекта (кадры № 1 и № 5, № 2 и № 6) показал, что нет необходимости сравнивать выявленные внутренние и внешние тепловые дефекты внешних ограждающих конструкций контролируемого объекта, поскольку они имеют разное происхождение. Мостики холода снаружи и внутри квартиры расположены не в одних и тех же точках отсчета (например, участки № 2 (М4) и № 6 (М2)).

Область потенциального образования конденсата была обнаружена на кадре № 6 (М2), поскольку температура в этих контрольных точках равна или ниже возможной температуры точки росы $t_{\text{dew}} = 14,2^\circ\text{C}$. Здесь наиболее вероятной причиной является техническое ухудшение качества теплоизоляции наружных ограждающих конструкций здания. Это обусловлено, во-первых, сроком эксплуатации строительного объекта, а во-вторых, несоответствием теплотехнических характеристик внешних ограждающих конструкций уровню тепловой защиты здания для условий города Вологда.

Таким образом, в холодный период года наружная стена промерзает, установленные стеклопакеты с ПВХ-оболочкой повышают относительную влажность внутреннего воздуха, а накопленное тепло в помещении вызывает образование конденсата. Точка росы становится выше при более высокой внутренней температуре и относительной влажности воздуха. Следовательно, наружная стена, и особенно нижнее стыковое соединение панелей (верхнее соединение дополнительно нагревается воздухом помещения за счет конвективной теплопередачи от нагревательных приборов, стояков и соединений), при низкой температуре наружного воздуха может иметь фактическую температуру, сопоставимую с температурой точки росы. Эти условия обычно приводят к образованию конденсата и плесени. Образования плесени вызывают процессы биокоррозии и биодеградации материалов.

Обсуждение

Авторы обладают многолетним практическим опытом в области тепловизионных исследований, который был использован для разработки перечня возможных мер по устранению явных или скрытых внутренних тепловых дефектов ограждающих конструкций:

1. Всесторонний технический осмотр межпанельных швов.
2. Внешняя теплоизоляция стен путем напыления пенополиуретана с защитным покрытием и (или) нанесения термомаски.
3. Антисептическая обработка мест образования плесени (например, с помощью Fongifluid).
4. Гидроизоляция внутренних поверхностей наружных стен (например, полижидкостью) или нанесение грунтовки глубокого проникновения на проблемные участки.
5. Внутренняя герметизация межпанельных швов пенополиуретаном (однокомпонентный пенополиуретановый герметик, например, Macroflex).
6. Установка оконных вентиляционных клапанов (например, Air-Vox Comfort) и (или) очистка вентиляционных каналов (для кухни).

Оценка технического состояния обследованных ограждающих конструкций квартиры блочно-модульного панельного многоквартирного жилого дома (физико-механические свойства

железобетона, наличие или отсутствие слоя теплоизоляции, его фактические тепловые характеристики и т.д.) может быть выполнена с использованием дополнительной экспертизы, которая включает в себя работы по вскрытию и демонтажу конструкции, лабораторный анализ образцов и т.д.

Повторное тепловизионное обследование, проведенное после тепловой реконструкции проблемных зон здания, позволит оценить энергоэффективность мероприятия. В свою очередь, расчет технико-экономического эффекта мероприятий, направленных на локализацию тепловых дефектов, выявленных в результате тепловизионной диагностики, основан на определении годовой разницы в потреблении тепла зданием до и после ремонта.

Заключение

Тепловизионная диагностика строительного объекта является важным элементом теплотехнической части энергетического обследования, предназначенным для измерения и контроля фактического температурного поля поверхности излучения, которое может включать внешние ограждающие конструкции, внутренние источники тепла (система отопления) и т.д.

Авторы работы на примере жилой квартиры действующего объекта завершенного строительства показывают некоторые методические и инженерные особенности и преимущества тепловизионных съемок, которые в последнее время стали актуальными и востребованными на рынке строительной недвижимости. Проанализированы выявленные теплотехнические дефекты и предложены рекомендации по их устранению.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Owen G.** Energy efficiency and energy conservation: Policies, Programmes and their effectiveness // *Energy & Environment*. 2000. Т. 11. № 5. С. 553–564.
- [2] **Vera I., Langlois L.** Energy indicators for sustainable development // *Energy*. 2007. Т. 32. 6 С. 875–882.
- [3] **Wagner O., Götz T.** Presentation of the 5Ds in energy policy: a policy paper to show how Germany can regain its role as a pioneer in energy policy // *Energies*. 2021. Т. 14. № 20. С. 6799.
- [4] **Biswas K., Shrestha S., Hun D., Atchley J.** Thermally anisotropic composites for improving the energy efficiency of building envelopes // *Energies*. 2019. Т. 12. № 19. С. 3783, 12.
- [5] **Economidou M., Todeschi V., Bertoldi P., D'Agostino D., Zangheri P., Castellazzi L.** Review of 50 2022s of EU energy efficiency policies for buildings // *Energy and Buildings*. 2020. Т. 225. С. 11032.
- [6] **Pisello A. L., Castaldo V. L., Rosso F., Piselli C., Ferrero M., Cotana F.** Traditional and innovative materials for energy efficiency in buildings // *Key Engineering Materials*. Trans Tech Publications Ltd. 2016. Т. 678. С. 14–34.
- [7] **da Cunha S.R.L., de Aguiar J.L.B.** Phase change materials and energy efficiency of buildings: A review of knowledge // *Journal of Energy Storage*. 2020. Т. 27. С. 101083.
- [8] **Michailidis I.T., Sangi R., Michailidis P., Schild T., Fuettere J., Mueller D., Kosmatopoulos E.B.** Balancing energy efficiency with indoor comfort using smart control agents: a simulative case study // *Energies*. 2020. Т. 13. № 23. С. 6228.
- [9] **Kwiatkowski J., Rucińska J.** Estimation of energy efficiency class limits for multi-family residential buildings in Poland // *Energies*. 2020. Т. 13. № 23. С. 6234.
- [10] **Tabatabaei S.A., Van der Ham W., CA Klein M., Treur J.** A data analysis technique to estimate the thermal characteristics of a house // *Energies*. 2017. Т. 10. № 9. С. 1358.
- [11] **Chowdhury D., Neogi S.** Thermal performance evaluation of traditional walls and roof used in tropical climate using guarded hot box // *Construction and Building Materials*. 2019. Т. 218. С. 73–89.
- [12] **Lu X., Memari A.** Application of infrared thermography for in-situ determination of building envelope thermal properties // *Journal of Building Engineering*. 2019. Т. 26. С. 100885.

- [13] Garrido I., Lagüela S., Otero R., Arias P. Thermographic methodologies used in infrastructure inspection: A review—Post-processing procedures // *Applied Energy*. 2020. T. 266. С. 114857.
- [14] Bayomi N., Nagpal S., Rakha T., Fernandez J.E. Building envelope modeling calibration using aerial thermography // *Energy and Buildings*. 2021. T. 233. С. 110648.
- [15] Шойхет Б.М. СП 61.13330. 2012 «Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов»: правила расчета и проектирования // *Научное обозрение*. 2013. №. 9. С. 138–141.
- [16] Павлов М.В., Карпов Д.Ф., Князев В.А. Качественно-количественный анализ тепловых изображений в строительной термографии // *Научный журнал «Вестник ВоГУ. Серия: Технические науки»*. Вологда: ВоГУ. 2019. №. 4. С. 6.
- [17] Карпов D. The algorithm of complex diagnostics of technical condition of building structures on thermograms analysis // *Constr. Mater. Prod.* 2020. № 2. С. 23.
- [18] Соловьева А., Соловьев С. Reliability analysis of rhs steel trusses joints based on the p-boxes approach // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2021. T. 17. № 1. — С. 87–97.
- [19] Карпов D.F. Application of active and passive thermal control in defectoscopy of construction materials and products, filler structures of buildings and constructions // *Stroitel'nye materialy i izdeliya Construction Building Materials and Products*. 2019. T. 2. № 4. С. 39–44.
- [20] Карпов Д.Ф. Тепловые методы и средства контроля теплопроводности термокраски // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2019. № 2. С. 61–68, 61.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

СИНИЦЫН Антон Александрович — *заведующий кафедрой Теплогазоводоснабжения, Вологодский государственный университет, канд. техн. наук.*
E-mail: sinitsyn.science@mail.ru

АХМЕТОВА Ирина Гареевна — *проректор по развитию и инновациям, Казанский государственный энергетический университет, д-р техн. наук.*
E-mail: irina_akhmetova@mail.ru

СОЛОВЬЕВА Ольга Викторовна — *доцент, Казанский государственный энергетический университет, канд. физ.-мат. наук.*
E-mail: solovyeva.ov@kgeu.ru

REFERENCES

- [1] G. Owen, Energy efficiency and energy conservation: Policies, Programmes and their effectiveness // *Energy & Environment*. 2000. T. 11. № 5. S. 553–564.
- [2] I. Vera, L. Langlois, Energy indicators for sustainable development // *Energy*. 2007. T. 32. 6 S. 875–882.
- [3] O. Wagner, T. Götz, Presentation of the 5Ds in energy policy: a policy paper to show how Germany can regain its role as a pioneer in energy policy // *Energies*. 2021. T. 14. № 20. S. 6799.
- [4] K. Biswas, S. Shrestha, D. Hun, J. Atchley, Thermally anisotropic composites for improving the energy efficiency of building envelopes // *Energies*. 2019. T. 12. № 19. S. 3783, 12.
- [5] M. Economidou, V. Todeschi, P. Bertoldi, D. D'Agostino, P. Zangheri, L. Castellazzi, Review of 50 years of EU energy efficiency policies for buildings // *Energy and Buildings*. 2020. T. 225. S. 11032.

- [6] A.L. Pisello, V.L. Castaldo, F. Rosso, C. Piselli, M. Ferrero, F. Cotana, Traditional and innovative materials for energy efficiency in buildings // *Key Engineering Materials*. Trans Tech Publications Ltd. 2016. T. 678. S. 14–34.
- [7] S.R.L. da Cunha, J.L.B. de Aguiar, Phase change materials and energy efficiency of buildings: A review of knowledge // *Journal of Energy Storage*. 2020. T. 27. S. 101083.
- [8] I.T. Michailidis, R. Sangi, P. Michailidis, T. Schild, J. Fuettere, D. Mueller, E.B. Kosmatopoulos, Balancing energy efficiency with indoor comfort using smart control agents: a simulative case study // *Energies*. 2020. T. 13. № 23. S. 6228.
- [9] J. Kwiatkowski, J. Rucińska, Estimation of energy efficiency class limits for multifamily residential buildings in Poland // *Energies*. 2020. T. 13. № 23. S. 6234.
- [10] S.A. Tabatabaei, W. Van der Ham, M. CA Klein, J. Treur, A data analysis technique to estimate the thermal characteristics of a house // *Energies*. 2017. T. 10. № 9. S. 1358.
- [11] D. Chowdhury, S. Neogi, Thermal performance evaluation of traditional walls and roof used in tropical climate using guarded hot box // *Construction and Building Materials*. 2019. T. 218. S. 73–89.
- [12] X. Lu, A. Memari, Application of infrared thermography for insitu determination of building envelope thermal properties // *Journal of Building Engineering*. 2019. T. 26. S. 100885.
- [13] I. Garrido, S. Lagüela, R. Otero, P. Arias, Thermographic methodologies used in infrastructure inspection: A review—Post-processing procedures // *Applied Energy*. 2020. T. 266. S. 114857.
- [14] N. Bayomi, S. Nagpal, T. Rakha, J.E. Fernandez, Building envelope modeling calibration using aerial thermography // *Energy and Buildings*. 2021. T. 233. S. 110648.
- [15] B.M. Shoykhet, SP 61.13330. 2012 «Teplovaya izolyatsiya oborudovaniya i truboprovodov»: pravila rascheta i proyektirovaniya // *Nauchnoye obozreniye*. 2013. № 9. S. 138–141.
- [16] M.V. Pavlov, D.F. Karpov, V.A. Knyazev, Kachestvenno-kolichestvennyy analiz teplovykh izobrazheniy v stroitel'noy termografii // *Nauchnyy zhurnal «Vestnik VoGU. Seriya: Tekhnicheskiye nauki»*. Vologda: VoGU. 2019. № 4. S. 6.
- [17] D. Karpov, The algorithm of complex diagnostics of technical condition of building structures on thermograms analysis // *Constr. Mater. Prod*. 2020. № 2. S. 23.
- [18] A. Solovyeva, S. Solovyev, Reliability analysis of rhs steel trusses joints based on the p-boxes approach // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2021. T. 17. № 1. — S. 87–97.
- [19] D.F. Karpov, Application of active and passive thermal control in defectoscopy of construction materials and products, filler structures of buildings and constructions // *Stroitel'nye materialy i izdeliya [Construction] Building Materials and Products*. 2019. T. 2. № 4. S. 39–44.
- [20] D.F. Karpov, Teplovyye metody i sredstva kontrolya teploprovodnosti termokraski // *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova*. 2019. № 2. S. 61–68, 61.

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Anton A. SINITSIN — *Vologda State University*.
E-mail: sinitsyn.science@mail.ru

Irina G. AKHMETOVA — *Kazan State Power Engineering University*.
E-mail: irina_akhmetova@mail.ru

Olga V. SOLOVEVA — *Kazan State Power Engineering University*.
E-mail: solovyeva.ov@kgeu.ru

Поступила: 03.11.2022; Одобрена: 08.12.2022; Принята: 09.12.2022.
Submitted: 03.11.2022; Approved: 08.12.2022; Accepted: 09.12.2022.