

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 772.962:699.86

DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-1-174-184

Оригинальная статья / Original Paper

**Выявление скрытых дефектов тепловой защиты зданий
и определение некоторых термических свойств конструкционных строительных
материалов неразрушающим методом тепловидения**

Д.Ф. Карпов, М.В. Павлов, А.Г. Гудков

Вологодский государственный университет,
160000, г. Вологда, ул. Ленина, д. 15, Россия

Резюме. Цель. Целью работы является практическая апробация неразрушающего метода тепловидения для выявления скрытых (невидимых) дефектов и качественного анализа тепловой защиты комплекса строительных объектов в городе Вологде, а также исследования некоторых физических (теплофизических) показателей (коэффициентов теплопроводности, термического сопротивления (теплоизоляции) и теплопередачи) конструкционного строительного материала в виде кирпича силикатного. **Метод.** Основопологающие законы теорий теплопередачи, теплового неразрушающего контроля, инфракрасной и технической диагностики, действующая отечественная нормативно-техническая и нормативно-правовая документация, натурные эксперименты на реальных объектах и лабораторных образцах. **Результат.** Представлены итоги практического определения скрытых дефектов тепловых оболочек комплекса функционирующих в городской среде гражданских и промышленных зданий, теплофизических свойств (коэффициентов теплопроводности, термического сопротивления (теплоизоляции), теплопередачи) современных строительных материалов методами теплового неразрушающего контроля. Определены локации идентифицированных невидимых дефектов тепловой защиты обследуемых строительных объектов и предложены рекомендации по их устранению. Полученные значения теплофизических характеристик для исследуемого конструкционного строительного материала согласуются с данными актуальных нормативных документов. **Вывод.** Показаны особенности неразрушающего метода инфракрасной термографии в определении скрытых дефектов теплозащитных оболочек эксплуатируемых зданий различного функционального назначения и комплекса теплофизических параметров современных конструкционных строительных материалов. Экспериментально подтверждена востребованность тепловидения при проведении энергетических и технических обследований строительных объектов, их отдельных структурных элементов, инженерных систем жизнеобеспечения, а также исследований по уточнению, количественной оценке и прогнозированию различных термических свойств строительных материалов и изделий.

Ключевые слова: тепловидение, строительная термография, инфракрасная термография, тепловой неразрушающий контроль, тепловизионный контроль, тепловизор, термограмма, теплограмма, тепловое изображение, тепловая защита здания, тепловая оболочка здания, тепловой дефект, технический дефект, конструкционный строительный материал, коэффициент теплопроводности, коэффициент термического сопротивления (коэффициент теплоизоляции), коэффициент теплопередачи, кирпич силикатный

Для цитирования: Д.Ф. Карпов, М.В. Павлов, А.Г. Гудков. Выявление скрытых дефектов тепловой защиты зданий и определение некоторых термических свойств конструкционных строительных материалов неразрушающим методом тепловидения. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023; 50(1):174-184. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-1-174-184

Detection of hidden defects of thermal protection of buildings and determination of some thermal properties of structural building materials by Non-destructive Thermal Imaging method

D.F. Karpov, M.V. Pavlov, A.G. Gudkov

Vologda State University,
15 Lenin St., Vologda 160000, Russia

Abstract. Objective. The purpose of the work is the practical approbation of a non-destructive thermal imaging method to identify hidden (invisible) defects and qualitative analysis of the thermal protection of a complex of construction objects in the city of Vologda, as well as the study of some physical (thermophysical) indicators (coefficients of thermal conductivity, thermal resistance (thermal insulation) and heat transfer) of structural building material in the form of silicate brick. **Method.** The fundamental laws of the theory of heat transfer, thermal non-destructive testing, infrared and technical diagnostics, the current domestic regulatory and technical and regulatory documentation, field experiments on real objects and laboratory samples. **Result.** The results of the practical determination of hidden defects in the thermal shells of the complex of civil and industrial buildings functioning in the urban environment, thermophysical properties (coefficients of thermal conductivity, thermal resistance (thermal insulation), heat transfer) of modern building materials by methods of thermal non-destructive testing are presented. The locations of identified invisible defects of thermal protection of the surveyed construction objects are determined and recommendations for their elimination are proposed. The obtained values of thermophysical characteristics for the studied structural building material are consistent with the data of current regulatory documents. **Conclusion.** The features of the non-destructive method of infrared thermography in determining the hidden defects of the heat-shielding shells of operated buildings of various functional purposes and the complex of thermophysical parameters of modern structural building materials are shown. The demand for thermal imaging during energy and technical surveys of construction objects, their individual structural elements, life support engineering systems, as well as studies on the refinement, quantification and prediction of various thermal properties of building materials and products has been experimentally confirmed.

Keywords: thermal imaging, construction thermography, infrared thermography, thermal non-destructive testing, thermal imaging, thermal imager, thermogram, thermal diagram, thermal image, thermal protection of a building, thermal envelope of a building, thermal defect, technical defect, structural building material, thermal conductivity coefficient, thermal resistance coefficient (thermal insulation coefficient), heat transfer coefficient, silicate brick

For citation: D.F. Karpov, M.V. Pavlov, A.G. Gudkov. Detection of hidden defects of thermal protection of buildings and determination of some thermal properties of structural building materials by Non-destructive Thermal Imaging method. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science. 2023; 50(1):174-184. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-1-174-184

Введение. Относительно недавно, такое понятие, как строительная термография, было известно узкому кругу специалистов [1]. Тепловизионный контроль ассоциировался с чем-то сложным и далеким от реальности. В мировой практике строительная тепловизионная диагностика используется с 60-ых годов 20 века. Пионером строительной термографии была шведская фирма AGA (затем AGEMA Infrared Systems), которая в 1998-1999 годы объединилась с американскими фирмами FLIR и Inframetrics, создав к настоящему времени крупнейшую мировую компанию FSI. Скандинавия, Финляндия, Канада и США являются первыми странами, где тепловидение в строительстве нашло широкое практическое применение. Началом внедрения метода в России (СССР) можно считать 60-ые годы 20 века, когда фирма AGA начала осваивать рынок тепловидения и теплового контроля [1–3]. Сегодня современные технологии и оборудование позволяют техническим специа-

листам, работающим в строительной и смежных отраслях промышленности и производства, в полной мере применять термографирование в повседневной профессиональной деятельности [4–16]. Для этого применяются измерительные приборы – тепловизоры, которые «видят» тепловое инфракрасное излучение контролируемых объектов [17–31]. Матрица прибора способна воспринимать излучение и в виде электронных сигналов передавать эту информацию в микропроцессор, который непосредственно обрабатывает и пересчитывает ее в температуру и выводит на дисплей прибора в виде цветной картинке – термограммы (теплограммы), где каждому цвету соответствует своя температура. Таким образом, тепловизор создает тепловое изображение практически любого теплогенерирующего и/или теплопотребляющего объекта (рис. 1). Во многом принцип работы тепловизора похож на работу обычного цифрового фотоаппарата. Кроме того, основные части этих приборов тоже одинаковы: корпус, объектив, матрица и ряд других составляющих. Принципиальная разница этих приборов в том, что цифровая камера фиксирует реальное изображение объекта, а инфракрасная камера-тепловизор – тепловое, и позволяет пользователю анализировать температурное поле объекта контроля [1, 4, 13, 21].



Рис. 1. Примеры и результаты наружного оперативного контроля тепловой защиты гражданских зданий неразрушающим методом строительной термографии (информация из открытых (свободных) источников сети Интернет)

Fig. 1. Examples and results of external operational control of thermal protection of civil buildings by non-destructive method of building thermography (information from open (free) sources on the Internet)

Обладая способностью «видеть» теплоту, тепловизоры активно применяются в строительной сфере при выявлении дефектов, под которыми в широком смысле понимают каждое отдельное несоответствие продукции требованиям нормативной технической документации в соответствующей области. Дефекты ограждающих конструкций приводят к нарушению теплоизоляции, способствуя образованию избыточных тепловых потерь, являющихся маркером качества строительства с точки зрения энергосбережения и энергоэффективности функционирования инженерных систем и оборудования, а также всего здания в целом [5–10]. Следует отметить, что применение тепловизионной техники в строительстве уже вышло за рамки диагностики только ограждающих конструкций зданий и идентификации теплотехнических дефектов. Тепловизоры все более активно используются при обследовании инженерных систем жизнеобеспечения и поиске локаций технических коммуникаций в стенах и перекрытиях строительных объектов. Например, с помощью тепловизора в онлайн-режиме можно провести диагностику эксплуатируемых систем горячего водоснабжения, теплых полов, электроснабжения под напряжением [1, 13, 20].

Тепловизионная диагностика объектов контроля любого назначения подразумевает комплекс работ, требующих наличия не только соответствующего приборно-измерительного оборудования, но и квалифицированного специалиста или группы специалистов. Итоговой частью тепловизионного контроля, как правило, является отчет о выполненной работе. В США, Швеции, Финляндии утверждены национальные стандарты и разработаны инструктивные указания (guidelines) по строительному тепловидению. В Европе действует стандарт ISO 6781-83, который вводит соответствующую терминологию и определяет самые общие положения. В России первый нормативный документ по тепловизионному контролю появился в 1985 году (ГОСТ «Метод тепловизионного контроля качества теплоизоляции ограждающих конструкций»). В 2021 году под прежним названием опубликован обновленный национальный стандарт (ГОСТ Р). Особенностью

процесса тепловизионного контроля является то, что он может быть обзорным или детальным (рис. 2).



Рис. 2. Примеры и результаты онлайн-определения дефектов тепловой защиты зданий, инженерных систем жизнеобеспечения в процессе наружного обзорного и внутреннего детального термографирования (информация из открытых (свободных) источников сети Интернет)

Fig. 2. Examples and results of online determination of defects in the thermal protection of buildings, engineering life support systems in the process of external overview and internal detailed thermography (information from open (free) sources on the Internet)

Под обзорным термографированием понимают тепловизионную съемку наружных и/или внутренних поверхностей ограждающих конструкций с сохранением термограмм в памяти тепловизора и/или на внешних съемных носителях памяти и с обязательным составлением отчета о термографическом обследовании.

При детальном термографировании выполняют тепловизионную съемку выделенных участков наружных и/или внутренних поверхностей ограждающих конструкций с последующим аналогичным сохранением термограмм и составлением итогового отчета [4, 27]. При тепловизионном обследовании, кроме тепловизора, также может применяться и другое оборудование, к которому относятся: термодатчики, пирометры, измерители теплопроводности и плотности материалов, измерители плотности тепловых потоков, термокраски, термокарандаши, иные вспомогательные инструменты и приборы. Например, принцип действия пирометра, как и тепловизора, основан на измерении мощности теплового излучения объекта преимущественно в диапазоне инфракрасного излучения и видимого света. Однако тепловизор позволяет получить температуру множества точек поверхности объекта, а пирометр – в одной точке.

Из очевидных достоинств тепловидения выделим следующие: безопасность и возможность проведения тепловизионной съемки на расстоянии, возможность тепловизионного контроля в режиме реального времени, достоверность и точность получаемых результатов, многофункциональность специализированного программного обеспечения при качественной обработке термограмм, применение неразрушающего метода инфракрасной термографии в особых климатических зонах и условиях [18].

Постановка задачи. В исследовании поставлены две задачи, требующие решения:

1. Выявление тепловых дефектов и качественный анализ тепловой защиты комплекса строительных объектов в городе Вологде по результатам их тепловизионного контроля.

2. Определение (количественная оценка) некоторых термических показателей (коэффициентов теплопроводности, термического сопротивления (теплоизоляции) и теплопередачи) конструкционного строительного изделия в виде кирпича силикатного по результатам термографирования фрагмента стены здания.

Решение задач реализуется в натуральных экспериментальных условиях на реальных объектах и образцах лабораторной установки. Основные стадии тепловизионного контроля зданий: изучение генерального и ситуационного планов местности расположения объектов контроля; ознакомление с проектно-технической документацией обследуемых объектов контроля; планирование и проведение термографирования объектов контроля; создание базы данных фотоизображений и термограмм по результатам термографирования; качественный анализ результатов термографирования объектов контроля (обработка и расшифровка термограмм).

Основные этапы тепловизионного контроля фрагмента стены здания из кирпича силикатного: планирование эксперимента; подготовка лабораторной установки; предвари-

тельный нагрев контролируемого объекта; подготовка и проведение тепловизионного обследования; формирование базы данных фотоизображений и термограмм; качественный и количественный анализ тепловых изображений. Перед проведением тепловизионного контроля объекты термографирования не должны подвергаться воздействию внешними источниками теплоты, в том числе прямыми и отраженными солнечными лучами. Время условной «выдержки» перед термографированием должно составлять не менее 12 часов.

Методы исследования. Научной основой работы являются фундаментальные положения теорий теплообмена и теплового неразрушающего контроля, технической и инфракрасной диагностики, способы качественно-количественной оценки термограмм. Применяемые методы получения, обработки и анализа результатов исследования базируются на действующих нормативных технических и правовых документах России, федеральных законах, современных и актуальных научных работах, изобретениях отечественных и зарубежных авторов, классических учебных и справочных материалах.

Обсуждение результатов. Натурные эксперименты на реальных объектах. Одним из наиболее часто встречающихся дефектов панельных зданий является нарушение теплоизоляции монтажных швов, приводящие к промерзанию стен и перекрытий, что влечет за собой дискомфортные условия проживания для собственников жилья и развитие биокоррозии на внутренних поверхностях наружных стен. При этом внешне такие дефекты не видны. Тепловизионный контроль позволяет выявлять такие нарушения и принимать меры для их своевременного устранения. По такому же принципу могут быть выявлены другие наружные дефекты ограждающих конструкций: дефекты теплоизоляции цокольных этажей и подвальных помещений, дефекты установки стеклопакетов и кровли т др. На рис. 3 представлены идентифицированные дефекты тепловой защиты комплекса зданий.

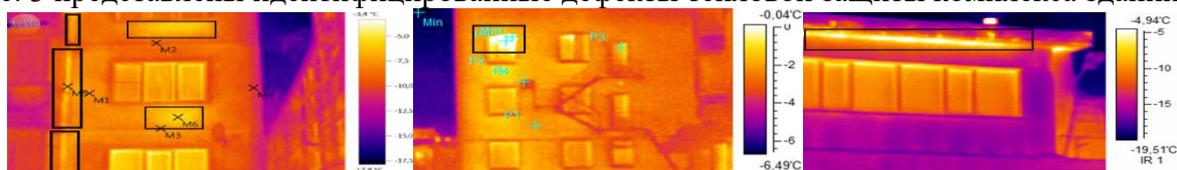


Рис. 3. Примеры качественного анализа термограмм по результатам наружной тепловизионной съемки ограждающих конструкций гражданских и промышленных зданий
(© Д.Ф. Карпов, М.В. Павлов, А.Г. Гудков)

Fig. 3. Examples of qualitative analysis of thermograms based on the results of outdoor thermal imaging of enclosing structures of civil and industrial buildings
(© D.F. Karpov, M.V. Pavlov, A.G. Gudkov)

Не менее значимым видом обследования ограждающих конструкций зданий является внутренняя съемка. Такой вид инфракрасной диагностики позволяет выявить участки – «мостики холода», возникающие из-за дефектов теплоизоляции, которые приводят к тепловым потерям и могут иметь температуру ниже точки росы. В свою очередь, участки с температурой ниже точки росы приводят к конденсации влаги и промерзанию ограждающих конструкций, что является дефектом с точки зрения нормативно-технической документации в сфере строительства. Функциональные возможности современных тепловизионных устройств и сопутствующего специализированного программного обеспечения позволяют выделять на термограммах участки с температурой ниже точки росы, визуализировать эти области и принимать оперативные решения по устранению дефектов.

На рис. 4 показаны выявленные дефекты участков ограждающих конструкций комплекса зданий в виде «мостиков холода». Тепловизионная диагностика также позволяет визуально контролировать работу инженерных систем здания, например, отопления и теплоснабжения зданий. Данная возможность тепловидения прочно заняла свою нишу в строительной термографии. Тепловизионирование таких систем обеспечивает выявление температурных полей, засоров и дефектов радиаторов, а также позволяет определять фактический массовый расход теплоносителя через отопительный прибор [20].

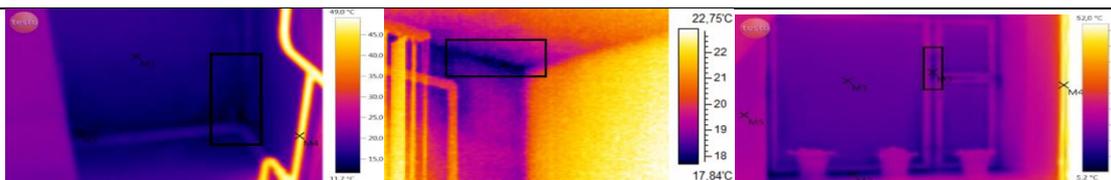


Рис. 4. Примеры качественного анализа термограмм по результатам внутренней тепловизионной съемки ограждающих конструкций жилых и общественных зданий
(© Д.Ф. Карпов, М.В. Павлов, А.Г. Гудков)

Fig. 4. Examples of qualitative analysis of thermograms based on the results of internal thermal imaging of enclosing structures of residential and public buildings
(© D.F. Karpov, M.V. Pavlov, A.G. Gudkov)

На рис. 5 изображены обнаруженные дефекты систем отопления и теплоснабжения в виде «мостиков холода» в месте входа стояка в междуэтажное перекрытие, нарушения теплоизоляции системы теплоснабжения и засора одной из секций радиатора отопления.

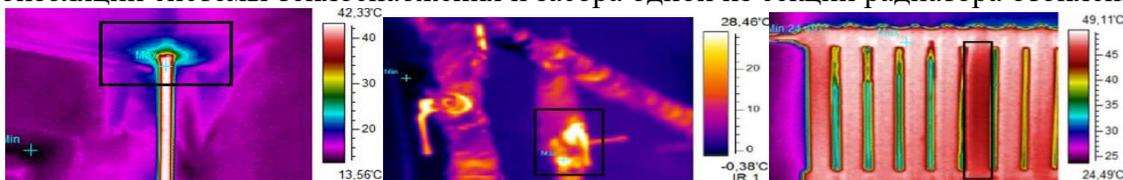


Рис. 5. Примеры качественного анализа термограмм по результатам внутренней тепловизионной съемки инженерных систем и установок жилых и общественных зданий
(© Д.Ф. Карпов, М.В. Павлов, А.Г. Гудков)

Fig. 5. Examples of qualitative analysis of thermograms based on the results of internal thermal imaging of engineering systems and installations of residential and public buildings
(© D.F. Karpov, M.V. Pavlov, A.G. Gudkov)

На рис. 3, 4, 5 локации выявленных на термограммах дефектов отмечены черными прямоугольниками. Теплотехнические дефекты устраняются, как правило, повторной и/или дополнительной теплоизоляцией и/или герметизацией известными классическими или инновационными утеплителями и герметиками [4, 6, 10, 14, 16, 18], а засоры секций конвективно-радиационных отопительных приборов – например, методом гидравлической или химической очистки [16, 18, 20]. Натурные лабораторные эксперименты на образцах. Экспериментальная установка, схема и алгоритм определения ключевых термических свойств – коэффициентов теплопроводности, термического сопротивления (теплоизоляции) и теплопередачи конструкционных строительных материалов и изделий неразрушающими методами строительной термографии подробно изложены в [4]. На рис. 6 представлены термограммы поверхностей фрагмента стены здания из силикатных кирпичей (кирпич строительный 3-х пустотный М150 по ГОСТ 379-2015 «Кирпич, камни, блоки и плиты перегородочные силикатные»).

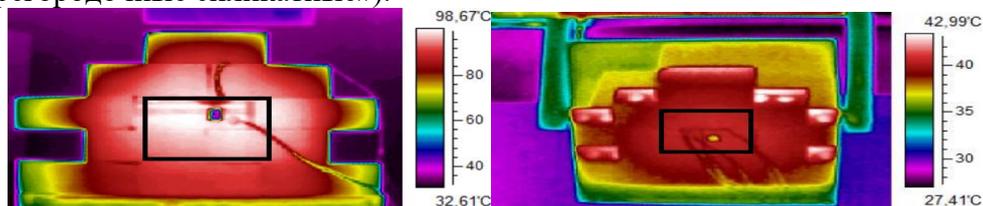


Рис. 6. Термограммы поверхностей фрагмента стены здания из силикатных кирпичей: слева – передняя поверхность стенки ($x = 0$), справа – задняя поверхность стенки ($x = \delta$)
(© Д.Ф. Карпов, М.В. Павлов, А.Г. Гудков)

Fig. 6. Thermograms of the surfaces of a fragment of a building wall made of silicate bricks: on the left - the front surface of the wall ($x = 0$), on the right - the back surface of the wall ($x = \delta$)
(© D.F. Karpov, M.V. Pavlov, A.G. Gudkov)

Выбор термограмм поверхностей фрагмента стенки здания из кирпичей силикатных выполнен с учетом их качества для получения объективной и достоверной информации о температурных полях поверхностей объекта контроля. По результатам серии экспериментов на лабораторной установке представлены расчетные значения коэффициентов

теплопроводности, термического сопротивления (теплоизоляции) и теплопередачи кирпича силикатного (табл.1).

Таблица 1. Экспериментально-расчетные значения теплофизических характеристик (теплопроводности (λ_t), теплоизоляции (R) и теплопередачи (k)) кирпича силикатного
Table 1. Experimental and calculated values of thermophysical characteristics (thermal conductivity (λ_t), thermal insulation (R) and heat transfer (k)) of silicate brick

№ п/п	q , Вт/м ²	δ , м	t_0 , °С	t_8 , °С	λ_t , Вт/(м·°С)	R , (м ² ·°С)/Вт	k , Вт/(м ² ·°С)
1	385	0,120	98,5	40,0	0,79	0,152	6,579
2			97,4	40,3	0,81	0,148	6,757
3			94,2	41,1	0,87	0,138	7,246
Средние значения $\lambda_{t, av}$, Вт/(м·°С), R_{av} , (м ² ·°С)/Вт, k_{av} , Вт/(м ² ·°С)					0,82	0,146	6,861

Полученное экспериментально-расчетным методом теплового неразрушающего контроля среднее значение коэффициента теплопроводности кирпича силикатного согласуется с нормативной величиной (СП «Проектирование тепловой защиты зданий»).

Полученные экспериментально-расчетным способом термические показатели позволяет количественно оценить теплотехнические показатели ограждающих конструкций зданий, определить фактические тепловые потери через наружные ограждения, проверить расчетные и конструктивные решения, сравнить их с нормативными требованиями [6, 10, 12, 19, 32, 33].

В порядке обсуждения результатов исследования и потенциальной дискуссии авторы работы выносят следующие утверждения:

1. Неразрушающими методами инфракрасной термографии идентифицированы невидимые дефекты тепловой защиты комплекса зданий в городе Вологде. По результатам тепловизионного контроля выполнен качественный анализ полученных термограмм и выявлены локации теплотехнических дефектов, варианты устранения которых, подробно изложены в [4, 6, 8, 10, 13].

2. Неразрушающие методы тепловидения в режиме реального времени позволяют безопасно и быстро выполнять анализ и техническую диагностику текущего состояния объектов строительства и отдельных структурных элементов зданий, проводить оценку энергоэффективности их функционирования, а также разрабатывать энергосберегающие мероприятия [2, 3, 15].

3. Тепловизионный мониторинг обеспечивает возможность непрерывной диагностики теплозащитных оболочек контролируемых объектов строительства в процессе их эксплуатации, обнаружения мест локализации скрытых (невидимых) дефектов на всех стадиях появления с последующей разработкой мероприятий по их устранению и, соответственно, уменьшения стоимости технических обследований [1–18, 20–31].

4. Неразрушающим методом тепловизионного контроля определены некоторые теплофизические показатели (коэффициенты теплопроводности, термического сопротивления (теплоизоляции) и теплопередачи) конструкционного строительного изделия в виде кирпича силикатного.

5. Экспериментальная установка [4, 8, 12] позволяет неразрушающим методом тепловидения исследовать и другие фактические значения термических показателей конструкционных, тепло- и гидроизоляционных строительных материалов и готовых изделий: температуропроводности, теплового (температурного) расширения, тепловой инерции и др.

Вывод. Результатом исследования является демонстрация возможностей и специфики неразрушающих методов инфракрасной термографии в идентификации скрытых дефектов теплозащитных оболочек зданий различного назначения и количественной оценке (уточнении) комплекса теплофизических свойств современных конструкционных материалов. Тепловидение является актуальным и инновационным методом обследования зданий, сооружений и их отдельных элементов, дает возможность качественно и количе-

ственно оценить уровень энергоэффективности строительных объектов и работу различного технологического оборудования, анализировать техническое состояние строительных конструкций, выполнять поиск скрытых дефектов.

Неразрушающие методы и средства тепловизионного контроля находят все более активное практико-ориентированное применение в следующих производственно-промышленных сферах жизнедеятельности: энергетика, машиностроение, металлургия, транспорт, электроснабжение, теплоснабжение и др. [1, 13, 17]

Библиографический список:

1. Основы современной строительной термографии / Е. В. Левин, А. Ю. Окунев, Н. П. Умнякова, И. Л. Шубин; под общ. ред. И. Л. Шубина. – Москва: НИИСФ РААСН. – 2012. – 176 с.
2. Шашков, А. Ф. Инновационные методы обследования зданий и сооружений / А. Ф. Шашков, О. С. Гамаюнова // *Высокие технологии в строительном комплексе*. – 2022. – № 2. – С. 136-146.
3. Чакин, Е. Ю. Современные тенденции повышения энергоэффективности зданий / Е. Ю. Чакин, О. С. Гамаюнова // *Неделя науки ИСИ: Материалы всероссийской конференции в 3-х частях, Санкт-Петербург, 26-30 апреля 2021 года / Инженерно-строительный институт Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. Том Часть 2. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. – 2021. – С. 212-215.*
4. Карпов, Д. Ф. Специфика комплексного тепловизионного мониторинга современных гражданских зданий и теплофизических свойств ограждающих конструкций из строительных материалов массового производства / Д. Ф. Карпов, М. В. Павлов, А. Г. Гудков // *Вестник ДГТУ. Технические науки*. – 2021. – Т. 48. – № 4. – С. 147 – 158. DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-4-147-158.
5. Игнатюк, А. С. Информационная система тепловизионного обследования конструкций здания / А. С. Игнатюк, С. Д. Николенко, С. А. Сазонова // *Информационные технологии в строительных, социальных и экономических системах*. – 2021. – № 2 (24). – С. 88-94.
6. Павлов, М. В. Анализ результатов энергетического обследования общественного здания на примере стоматологической поликлиники / М. В. Павлов, Д. Ф. Карпов, А. Г. Гудков // *Научно-технический журнал «Энергосбережение и водоподготовка»*. – 2022. – № 5 (139). – С. 28-32.
7. Использование тепловизионной съемки для поиска скрытых дефектов / В. А. Шинкевич, Д. А. Гресь, И. И. Еремеев [и др.] *Актуальные проблемы военно-научных исследований*. – 2020. – № 6 (7). – С. 285-295.
8. Карпов, Д. Ф. Применение активного и пассивного теплового контроля в дефектоскопии строительных материалов и изделий, ограждающих конструкций зданий и сооружений / Д. Ф. Карпов // *Строительные материалы и изделия*, 2019. – Т. 2. – № 4. – С. 39-44.
9. Развитие и особенности диагностики строительных конструкций с применением тепловизионной съемки / А. И. Бедов, А. И. Габитов, А. С. Салов [и др.] // *Строительство и реконструкция*. – 2020. – № 1 (87). – С. 59-70. – DOI 10.33979/2073-7416-2020-87-1-59-70.
10. Павлов, М. В. Анализ результатов тепловизионного обследования гражданского здания общественного назначения / М. В. Павлов, Д. Ф. Карпов, А. Г. Гудков // *Научно-технический журнал «Энергосбережение и водоподготовка»*. – 2022. – № 2 (136). – С. 35-39.
11. Султамуратов, Н. Н. Применение метода термографии для определения технического состояния строительных конструкций / Н. Н. Султамуратов, Д. В. Цыгулев // *Инновационные подходы в современной науке: сборник статей по материалам XLIV международной научно-практической конференции, Москва, 19 апреля 2019 года. Том 8 (44). – Москва: Общество с ограниченной ответственностью «Интернаука». – 2019. – С. 114-118.*
12. Карпов Д.Ф. Активный метод теплового контроля теплопроводности строительных материалов и изделий// *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*, 2019.–№7.–С.57-62doi:10.34031/article_5d35d0b79c34c5.75173950.
13. Вавилов, В. П. Тепловидение и тепловой контроль для инженеров. Изд. 1-е. Москва: Издательский дом «СПЕКТР». – 2017. – 72 с.
14. Карпов, Д. Ф. Оценка теплозащитных свойств ограждающих конструкций строительных объектов по анализу термограмм / Д. Ф. Карпов, М. В. Павлов // *Вестник ДГТУ. Технические науки*. – 2021. – Т. 48. – № 2. – С. 92-102. DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-2-92-102.
15. Пешков, А. А. Применение современных средств термографии для оценки энергоэффективности строительных объектов / А. А. Пешков, Н. М. Анисимов // *Научный вклад молодых исследователей в сохранение традиций и развитие АПК : Сборник научных трудов Международной научно-практической конференции молодых учёных и студентов, Санкт-Петербург-Пушкин, 31 марта – 01 2016 года. Том Часть I. – Санкт-Петербург-Пушкин: Санкт-Петербургский государственный аграрный университет. – 2016. – С. 249-252.*

16. Карпов, Д. Ф. Алгоритм комплексной диагностики технического состояния строительных конструкций по анализу термограмм // Строительные материалы и изделия. – 2019. – Т. 2. – № 2. – С. 23-28.
17. Власов, А. Б. Оценка тепловых потоков технологического оборудования методом количественной термографии / А. Б. Власов, Ю. В. Шокина, К. Б. Аллюров // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2012. – № 26. – С. 414-421.
18. Карпов, Д. Ф. Эколого-экономические аспекты ресурсосберегающих технологий строительства и эксплуатации энергоэффективных зданий в особых климатических зонах / Д.Ф. Карпов, М.В. Павлов // Проблемы экономического роста и устойчивого развития территорий: материалы VII международной науч.-практ. интернет-конференции, г. Вологда, 11-13 мая 2022 г. – Вологда: Вологодский научный центр РАН. – 2022. – С. 375-378.
19. Желнин, М. С. Определение теплофизических констант материала на основе метода инфракрасной термографии / М. С. Желнин, А. Ю. Изюмова, О. А. Плехов // Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций : Сборник материалов, Екатеринбург, 16–20 мая 2016 года. – Екатеринбург: ИМАШ УрО РАН. – 2016. – С. 306-307.
20. Тепловизионный метод определения расхода воды через отопительный прибор / М. В. Павлов, Д. Ф. Карпов, В. А. Агафонов [и др.] // Научно-технический журнал «Инженерные системы». «АВОК – Северо-Запад». – Санкт-Петербург. – 2017. – № 4. – С. 34-36.
21. Lucchi, E. Applications of the infrared thermography in the energy audit of buildings: A review / E. Lucchi // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2018. – Vol. 82. – Pp. 3077-3090. – DOI 10.1016/j.rser.2017.10.031.
22. Comparative analysis of infrared thermography and CFD modelling for assessing the thermal performance of buildings / C. Morón, D. Ferrández, R. Felices, P. Saiz // Energies. – 2018. – Vol. 11. – No. 3. – P. 638. – DOI 10.3390/en11030638.
23. A model for the improvement of thermal bridges quantitative assessment by infrared thermography / G. Baldinelli, F. Bianchi, A. Rotili [et al.] // Applied Energy. – 2018. – Vol. 211. – Pp. 854-864. – DOI 10.1016/j.apenergy.2017.11.091.
24. Locating hidden elements in walls of cultural heritage buildings by using infrared thermography / H. Glavaš, T. Barić, M. Hadzima-Nyarko, I. H. Buljan. Buildings. 2019;2:32. – DOI 10.3390/buildings9020032.
25. Improving the detection of thermal bridges in buildings via on-site infrared thermography: The potentialities of innovative mathematical tools / S. Sfarra, S. Perilli, A. Cicone [et al.] // Energy and Buildings. – 2019. – Vol. 182. – Pp. 159-171. – DOI 10.1016/j.enbuild.2018.10.017.
26. Heat loss from defects of hinged facade systems of buildings / A. E. Rusanov, A. Kh. Baiburin, D. A. Baiburin, V. Bianco. Magazine of Civil Engineering. 2020;3 (95):57-65. – DOI 10.18720/MCE.95.6.
27. Thermographic methodologies used in infrastructure inspection: A review-Post-processing procedures / I. Garrido, R. Otero, P. Arias, S. Lagüela. Applied Energy. 2020;266:114857. – DOI 10.1016/j.apenergy.2020.114857.
28. Kolesnichenko, S. Detection of dangerous defects and damages of steel building structures by active thermography / S. Kolesnichenko, A. Popadenko, Y. Selyutyn // Materials Science Forum. – 2021. – Vol. 1038 MSF. – Pp. 417-423. – DOI 10.4028/www.scientific.net/MSF.1038.417.
29. Building envelope modeling calibration using aerial thermography / N. Bayomi, S. Nagpal, T. Rakha, J. E. Fernandez // Energy and Buildings. – 2021. – Vol. 233. – P. 110648. – DOI 10.1016/j.enbuild.2020.110648.
30. Golovin, Y. I. Dynamic Thermography for Technical Diagnostics of Materials and Structures / Y. I. Golovin, D. Y. Golovin, A. I. Tyurin // Russian metallurgy (Metally). – 2021. – Vol. 2021. – No. 4. – Pp. 512-527. – DOI 10.1134/S0036029521040091.
31. Milovanović, B. Principal component thermography for defect detection in concrete / B. Milovanović, M. Gaši, S. Gumbarević // Sensors. – 2020. – Vol. 20. – No. 14. – Pp. 1-21. – DOI 10.3390/s20143891.
32. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022611427. Программа для оценки соответствия теплозащитной оболочки жилого здания нормативным требованиям: № 2022610724: заявл. 25.01.2022: опубл. 25.01.2022. Бюл. № 2 / М. В. Павлов, Д. Ф. Карпов, В. А. Писаренко, С. В. Клопов, В. П. Жукова; правообладатель ВоГУ.
33. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022662093. Программа для оценки относительного сопротивления теплопередаче в различных точках ограждающей конструкции: № 2022660450: заявл. 09.06.2022: опубл. 29.06.2022. Бюл. № 7 / М. В. Павлов, Д. Ф. Карпов; правообладатель ВоГУ.

References:

1. The basics of modern construction thermography/E. V. Levin, A. Yu. Okunev, N. P. Umnyakova, I. L. Shubin; under the general. ed. I. L. Shubin. – Moscow: NIISF RAASN. 2012;176. (In Russ.).
2. Shashkov, A. F. Innovative methods for surveying buildings and structures / A. F. Shashkov, O. S. Gamaunova. *High technologies in the construction complex*. 2022; 2:136-146. (In Russ.).

3. Chakin, E. Yu. Modern trends in improving the energy efficiency of buildings / E. Yu. Chakin, O. S. Gamaunova . ISI Science Week: Materials of the All-Russian Conference in 3 Parts, St. Petersburg, April 26-30, 2021. *Engineering and Construction Institute of St. Petersburg Polytechnic University Peter the Great*. Volume Part 2. – St. Petersburg: St. Petersburg Polytechnic University of Peter the Great". 2021; 212-215. (In Russ.).
4. Karpov, D. F. Specifics of integrated thermal imaging monitoring of modern civil buildings and thermophysical properties of enclosing structures made of mass-produced building materials. D. F. Karpov, M. V. Pavlov, A. G. Gudkov. *Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences*. 2021; 48(4):. 147-158. DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-4-147-158. (In Russ.).
5. Ignatyuk, A. S. Information system for thermal imaging examination of building constrictions / A. S. Ignatyuk, S. D. Nikolenko, S. A. Sazonova. *Information technologies in construction, social and economic systems*. 2021; 2 (24):88-94. (In Russ.).
6. Pavlov, M. V. Analysis of the results of an energy survey of a public building on the example of a dental clinic / M. V. Pavlov, D. F. Karpov, A. G. Gudkov. *Scientific and technical journal "Energy saving and water treatment"*. 2022; 5 (139): 28-32. (In Russ.).
7. Using thermal imaging to search for hidden defects / V. A. Shinkevich, D. A. Gres, I. I. Eremeev [and others] *Actual problems of military-scientific research*. 2020; 6 (7): 285-295. (In Russ.).
8. Karpov, D. F. Application of active and passive thermal control in defective toscopy of building materials and products, enclosing structures of buildings and structures. *Construction materials and products*, 2019; 2(4): 39-44. (In Russ.).
9. Development and peculiarities of diagnostics of building structures using thermal imaging / A. I. Bedov, A. I. Gabitov, A. S. Salov [and others] *Construction and reconstruction*. 2020;1 (87):59-70. – DOI 10.33979/2073-7416-2020-87-1-59-70. (In Russ.).
10. Pavlov, M. V. Analysis of the results of a thermal imaging survey of a civilian public building / M. V. Pavlov, D. F. Karpov, A. G. Gudkov. *Scientific and technical journal "Energy saving and water treatment"*. 2022; 2 (136): 35-39. (In Russ.).
11. Sultamuratov, N. N. Application of the thermography method to determine the technical state of building structures / N. N. Sultamuratov, D. V. Tsygulev // *Innova approaches in modern science: a collection of articles on the materials of the XLIV international scientific and practical conference, Moscow, April 19, 2019.* – Moscow: Internauca Limited Liability Company. 2019; 8 (44). 114-118. (In Russ.).
12. Karpov, D. F. Active method of thermal control of thermal conductivity of building materials and products *Bulletin of BSTU named after V. G. Shukhova*, 2019;7:57-62. doi:10.34031/article_5d35d0b79c34c5.75173950. (In Russ.).
13. Vavilov, V. P. Thermal vision and thermal control for engineers. Ed. 1st. Moscow: SPEKTR Publishing House. 2017;72. (In Russ.).
14. Karpov, D. F. Assessment of the thermal protection properties of the enclosing structures of building objects based on the analysis of thermograms. D. F. Karpov, M. V. Pavlov. *Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences*. 2021; 48(2):92-102. DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-2-92-102. (In Russ.).
15. Peshkov, A. A. The use of modern thermography tools to assess the energy efficiency of construction facilities / A. A. Peshkov, N. M. Anisimov. Scientific contribution of young researchers to the preservation of traditions and the development of the agro-industrial complex: Collection of scientific works of the International Scientific and Practical Conference of Young Scientists and Students, St. Petersburg-Pushkin, March 31 – 01, 2016. Volume Part I. – St. Petersburg-Pushkin: St. Petersburg State Agrarian University. 2016; 249-252. (In Russ.).
16. Karpov, D. F. Algorithm for comprehensive diagnostics of the technical condition of building structures based on thermogram analysis. *Construction materials and products*. 2019; 2(2): 23-28. (In Russ.).
17. Vlasov, A. B. Assessment of heat flows of technological equipment by the method of quantitative thermography / A. B. Vlasov, Yu. V. Shokin, K. B. Alloyarov. *Izvestia of St. Petersburg State Agrarian University*. 2012; 26: 414-421. (In Russ.).
18. Karpov, D. F. Ecological and economic aspects of resource-saving technologies for the construction and operation of energy-efficient buildings in special climatic zones / D. F. Karpov, M. V. Pavlov // *Problems of economic growth and sustainable development of territories: materials of the VII international scientific practice. Internet conferences, Vologda, May 11-13, 2022 – Vologda: Vologda Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2022; 375-378. (In Russ.).
19. Zhelnin, M. S. Determination of thermophysical constants of a material based on an infra-red thermography method / M. S. Zhelnin, A. Yu. Izyumova, O. A. Plekhov. Mechanics, resource and diagnostics of materials and structures: Collection of materials, Yekaterinburg, May 16-20, 2016. – Yekaterinburg: IMASH UrO RAS. 2016; 306-307. (In Russ.).
20. Thermal imaging method for determining water consumption through a heating device / M. V. Pavlov, D. F. Karpov, V. A. Agafonov [and others]. *Scientific and technical journal "Engineering Systems". "AVOK – North-West"*. St. Petersburg. 2017; 4: 34-36. (In Russ.).

21. Lucchi, E. Applications of the infrared thermography in the energy audit of buildings: A review / E. Lucchi *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018;82: 3077-3090. – DOI 10.1016/j.rser.2017.10.031.
22. Comparative analysis of infrared thermography and CFD modelling for assessing the thermal performance of buildings / C. Morón, D. Ferrández, R. Felices, P. Saiz. *Energies*. 2018; 11(3):638. – DOI 10.3390/en11030638.
23. A model for the improvement of thermal bridges quantitative assessment by infrared thermography / G. Baldinelli, F. Bianchi, A. Rotili [et al.]. *Applied Energy*. 2018;211:854-864. – DOI 10.1016/j.apenergy.2017.11.091.
24. Locating hidden elements in walls of cultural heritage buildings by using infrared thermography / H. Glavaš, T. Barić, M. Hadzima-Nyarko, I. H. Buljan. *Buildings*. 2019; 9(2):32. – DOI 10.3390/buildings9020032.
25. Improving the detection of thermal bridges in buildings via on-site infrared thermography: The potentialities of innovative mathematical tools / S. Sfarra, S. Perilli, A. Cicone [et al.]. *Energy and Buildings*. 2019; 182: 159-171. – DOI 10.1016/j.enbuild.2018.10.017.
26. Heat loss from defects of hinged facade systems of buildings / A. E. Rusanov, A. Kh. Baiburin, D. A. Baiburin, V. Bianco. *Magazine of Civil Engineering*. 2020; 3 (95): 57-65. – DOI 10.18720/MCE.95.6.
27. Thermographic methodologies used in infrastructure inspection: A review-Post-processing procedures / I. Garrido, R. Otero, P. Arias, S. Lagüela. *Applied Energy*. 2020;266:114857. – DOI 10.1016/j.apenergy.2020.114857.
28. Kolesnichenko, S. Detection of dangerous defects and damages of steel building structures by active thermography / S. Kolesnichenko, A. Popadenko, Y. Selyutyn. *Materials Science Forum*. 2021; 1038: 417-423. – DOI 10.4028/www.scientific.net/MSF.1038.417.
29. Building envelope modeling calibration using aerial thermography / N. Bayomi, S. Nagpal, T. Rakha, J. E. Fernandez. *Energy and Buildings*. 2021; 233:110648. – DOI 10.1016/j.enbuild.2020.110648.
30. Golovin, Y. I. Dynamic Thermography for Technical Diagnostics of Materials and Structures / Y. I. Golovin, D. Y. Golovin, A. I. Tyurin. *Russian metallurgy (Metally)*. 2021;4:512-527. – DOI 10.1134/S0036029521040091.
31. Milovanović, B. Principal component thermography for defect detection in concrete / B. Milovanović, M. Gaši, S. Gumbarević. *Sensors*. 2020; 20(14): 1-21. – DOI 10.3390/s20143891.
32. Computer Program State Registration Certificate No. 2022611427. Program to assess the compliance of the thermal containment of a residential building with regulatory requirements: No. 2022610724: declared 25.01.2022: publ. 25.01.2022; 2. M. V. Pavlov, D. F. Karpov, V. A. Pisarenko, S. V. Klopov, V. P. Zhukova; right holder of VoSU. (In Russ.).
33. Computer Program State Registration Certificate No. 2022662093. Program for evaluating the relative resistance to heat transfer at various points of the enclosing structure: No. 2022660450: declared 09.06.2022: publ. 29.06.2022. Bull. No. 7 / M. V. Pavlov, D. F. Karpov; right holder of VoSU. (In Russ.).

Сведения об авторах:

Карпов Денис Федорович, старший преподаватель; karpovdf@vogu35.ru ORCID: 0000-0002-3522-9302; Scopus Author ID: 57210325021; WoS Researcher ID: AAF-2092-2021

Павлов Михаил Васильевич, доцент, кандидат технических наук; pavlovmv@vogu35.ru ORCID : 0000-0002-8687-3296; Scopus Author ID: 57204361039; WoS Researcher ID: AAN-5773-2021

Гудков Александр Геннадьевич, доцент, кандидат технических наук; gudkovag@vogu35.ru ORCID ID: 0000-0002-4903-2906; Scopus Author ID: 57219407924; WoS Researcher ID: AAN-2611-2021

Information about authors:

Denis F. Karpov, Senior Lecturer, karpovdf@vogu35.ru ORCID: 0000-0002-3522-9302; Scopus Author ID: 57210325021; WoS Researcher ID: AAF-2092-2021

Mikhail V. Pavlov, Cand. Sci. (Eng); Assoc. Prof.; pavlovmv@vogu35.ru ORCID : 0000-0002-8687-3296; Scopus Author ID: 57204361039; WoS Researcher ID: AAN-5773-2021

Alexander G. Gudkov, Cand. Sci. (Eng); Assoc. Prof.; gudkovag@vogu35.ru ORCID ID: 0000-0002-4903-2906; Scopus Author ID: 57219407924; WoS Researcher ID: AAN-2611-2021

Конфликт интересов/ Conflict of interest.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов/The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию/Received 24.12.2022.

Одобрена после/рецензирования Revised 20.01.2023.

Принята в печать/ Accepted for publication 20.01.2023.