СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 772.962:699.86
DOI: 10.21822/2073-6185-2021-48-4-147-158

Оригинальная статья/Original Paper

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

Резюме. Цель. Цель работы состоит в повышении точности определения ключевых теплофизических характеристик строительных материалов и изделий при стационарном тепловом режиме, а также расширении возможностей применения комплексного тепловизионного мониторинга при оценке теплопроводных качеств неоднородных однослойных строительных конструкций, находящихся, в том числе и в нестационарных температурных условиях. **Метод.** Методологической основой служат положения теорий теплопередачи, теплового контроля и инфракрасной диагностики, методы качественного и количественного анализа термограмм. **Результат.** Предложена схема комплексной неразрушающей диагностики теплотехнического состояния теплозащитных оболочек объектов капитального и завершенного строительства, инженерно-технических систем и подсистем жизнеобеспечения различного назначения по результатам термографирования и качественно-количественной оценки тепловых изображений. Обобщена практика применения тепловизионной техники и вспомогательного контрольно-измерительного оборудования в натурном обследовании светопрозрачных конструкций и несветопрозрачных вентилируемых фасадных систем реального здания гражданского назначения. Представлены итоги тепловизионной идентификации основных теплофизических свойств фрагмента ограждающей строительной конструкции в виде стенки из силикатного кирпича. **Вывод.** Представленный метод активного теплового неразрушающего определения основных теплофизических свойств конструкционных строительных материалов и изделий, также экспериментальная установка для его реализации, позволяют в различных условиях и режимах исследовать весь комплекс теплотехнических характеристик.

Ключевые слова: тепловой контроль, тепловизионный мониторинг и диагностика, тепловизионная съемка, термографирование, тепловизор, термограмма, тепловое изображение, объекты строительства, инженерная система, строительный материал и изделие, коэффициенты теплопроводности и теплопередачи, термическое сопротивление

Для цитирования: Д.Ф. Карпов, М.В. Павлов, А.Г. Гудков. Специфика комплексного тепловизионного мониторинга современных гражданских зданий и теплофизических свойств ограждающих конструкций из строительных материалов массового производства. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2021; 48(4): 147-158. DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-4-147-158

Specifics of integrated thermal imaging monitoring modern civil buildings and thermophysical properties of enclosing structures made of building materials of mass production

D.F. Karpov, M.V. Pavlov, A.G. Gudkov
Vologda State University,
15 Lenin Str., Vologda 160000, Russia

Abstract. Objective. The purpose of the study is to improve the technical procedure and increase the accuracy of determining the key thermophysical characteristics of building materials and products in a stationary thermal regime, as well as expanding the possibilities of using integrated thermal imaging monitoring in assessing the heat-conducting qualities of heterogeneous single-layer building structures, which are, including in non-stationary temperature conditions. **Method.** The methodological basis of the study is the fundamental provisions of the theories of heat transfer, thermal control and infrared diagnostics, methods of qualitative and quantitative analysis of thermograms. **Result.** The scheme of complex non-destructive diagnostics of the thermal and technical condition of heat-protective shells of capital and completed construction facilities, engineering and technical systems and subsystems of life support for various functional, technological, operational purposes based on the results of thermography and qualitative and quantitative assessment of thermal images is presented. Examples of the use of thermal imaging equipment and other auxiliary control and measuring equipment in the field examination of translucent structures and non-translucent ventilated facade systems of a real civil building are given, as well as the results of thermal imaging identification of the main thermal properties of a fragment of an enclosing building structure in the form of a wall of silicate brick. **Conclusion.** The presented method of active thermal non-destructive determination of the main thermophysical properties of structural building materials and products, as well as an experimental setup for its implementation, make it possible to study the entire range of thermal characteristics under various conditions and modes using a thermal imager and related instrumentation.

Keywords: thermal control, thermal imaging monitoring, thermal imaging diagnostics, thermal imaging, thermography, thermal imager, thermogram, thermal image, construction objects, engineering system, building material and product, thermal conductivity coefficient, thermal resistance, heat transfer coefficient

For citation: D.F. Karpov, M.V. Pavlov, A.G. Gudkov. Specifics of integrated thermal imaging monitoring modern civil buildings and thermophysical properties of enclosing structures made of building materials of mass production. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2021; 48(4):147-158. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-4-147-158

Введение. Стратегические вопросы энергоэффективности и энергоресурсосбережения в различных отраслях народного хозяйства (строительство, энергетика, машиностроение, транспорт и др.) входят в перечень приоритетных направлений развития науки, технологий и техники Российской Федерации (Указ Президента РФ от 7 июля 2011 г. № 899), а также в перечень критических технологий РФ. Жизненно важные задачи рационального использования энергоресурсов различной природы происхождения заложены в парадигму энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2030 года, в проект энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года; соответствуют Федеральному закону от 23 ноября 2009 года № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности…», стратегиям развития строительного и топливно-энергетического комплексов страны и отдельных субъектов РФ; отвечают целям национальных проектов «Экология» (2018-2024 гг.) и «Жилье и городская среда» (2018-2024 гг.), государственной программы РФ «Охрана окружающей среды»; составляют основу федеральной целевой программы обеспечения безопасности в России и полностью отвечают национальным интересам государства.

Так, согласно Федеральному закону от 23 ноября 2009 года № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации», тепловизионная диагностика объектов капитального и завершенного строительства является неотъемлемой частью энергетического обследования. Она позволяет оценивать качество тепловой защиты ограждающих конструкций зданий и сооружений, контролировать функциональное и эксплуатационное состояние инженерных систем, идентифицировать скрытые и явные дефекты в них. Тепловизионная диагностика базируется на методах и средствах теплового контроля [1–20]. В свою очередь тепловой контроль основан на измерении, мониторинге и анализе температуры обследуемых объектов.

Главным условием применения теплового контроля является наличие в контролируемом объекте тепловых потоков. Процесс передачи тепловой энергии, выделение или поглощение теплоты в объекте контроля приводит к тому, что его температура изменяется относительно окружающей среды. Распределение температуры по поверхности объекта контроля является основным параметром в тепловом методе, так как несет информацию об особенностях процесса теплопередачи (теплообмена), о режиме работы объекта контроля, его внутренней структуре, наличии или отсутствии дефектов [3, 16, 21]. Тепловые потоки в контролируемом объекте могут возникать по различным причинам.

Практически любой строительный объект (здание, сооружение, строение), при наличии инженерных систем кондиционирования микроклимата, является сложной структурой с точки зрения теплообмена. Воздушный и температурно-влажностный режим такого объекта формируются под действием внешних метеорологических (климатических) воздействий, внутренних теплопоступлений от отопительных приборов, оборудования, присутствия людей (бытовые теплопоступления) и совместной работы ограждающих конструкций и инженерных систем (в первую очередь систем отопления и вентиляции) [2, 4, 6, 8, 10, 12, 14].

Постановка задачи. В связи с этим продолжает оставаться актуальным и практически значимым текущий и оперативный контроль качества теплозащитных оболочек, как вводимых в эксплуатацию, так эксплуатируемых и прошедших капитальный ремонт, реконструкцию или модернизацию зданий. Такой тепловой контроль (тепловизионная инспекция) позволяет определить фактические теплопотери через ограждающие конструкции и сделать итоговое заключение о классе энергоэффективности контролируемых объектов (рис. 1).

Термографирование объектов капитального и завершенного строительства, инженерно-технических систем, отдельных установок и их элементов выполняют с помощью инфракрасного прибора – тепловизора [22, 23].

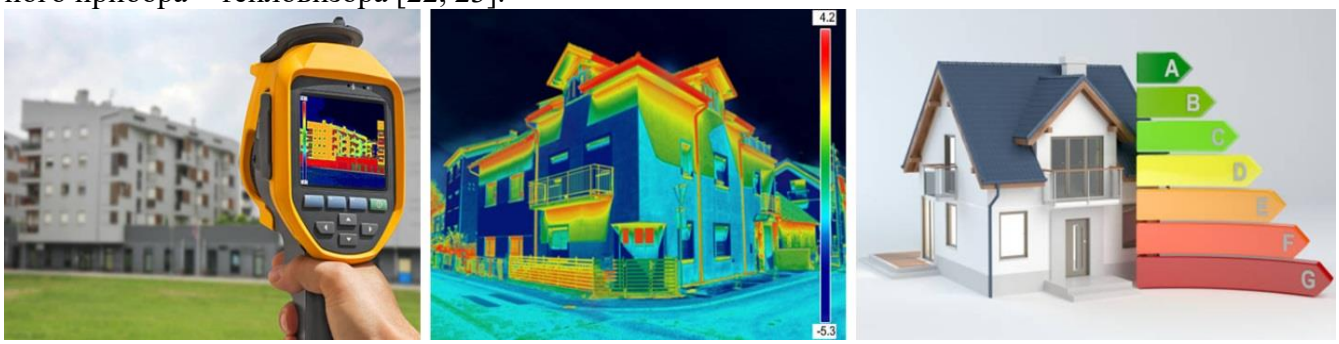


Рис. 1. Тепловизионный мониторинг современных объектов строительства в решении вопросов энергосбережения и повышения энергетической эффективности
Fig. 1. Thermal imaging monitoring of modern construction projects in addressing energy saving and energy efficiency issues

Особый интерес в настоящее время в проведении подобной тепловизионной (тепловой) диагностики наблюдается в отношении светопрозрачных фасадных систем зданий и сооружений, а также несветопрозрачных навесных вентилируемых фасадных систем объектов капитального и завершенного строительства [12, 13, 24–26].

В первом случае такой интерес обоснован высоким спросом на строительные объекты с большой площадью остекления для удовлетворения потребностей максимальной по времени естественной освещенности и инсоляции помещений.

Во втором случае – связан с увеличением количества капитальных ремонтов, модернизаций, реконструкций, реноваций в отношении существующих эксплуатируемых гражданских зданий и промышленных сооружений, необходимых для выполнения ужесточающихся требований к теплозащитным оболочкам различного назначения [1, 3, 5, 7, 9, 11]. Наряду с вышеиз-

ложенным, тепловизионная техника и сопутствующее контрольно-измерительное оборудование могут применяться для определения целого комплекса основных теплофизических свойств конструкционных, тепло- и гидроизоляционных строительных материалов и изделий: теплопроводности, температуропроводности, термического сопротивления, теплоемкости, тепловой активности, термостойкости и других [11, 13, 15, 17, 22, 27, 28].

Это обусловлено тем, что техническая сложность и большой объем экспериментальных исследований по определению качества, долговечности, надежности и безопасности традиционных и современных строительных материалов и изделий требуют разработки новых и усовершенствования существующих методов и средств неразрушающего контроля и технической диагностики [29–32]. При помощи этих методов и средств можно идентифицировать указанные свойства исследуемых строительных материалов и готовых изделий по определяемым теплофизическим характеристикам [11, 13, 15, 17, 19, 22, 23, 27, 28, 30, 32].

Методы исследования. Методологической основой исследования служат фундаментальные положения теорий теплопередачи, теплового контроля и инфракрасной диагностики, методы качественного и количественного анализа термограмм. Применяемые методы исследования и обработки полученных результатов базируются на действующих нормативных документах РФ, федеральных законах, современных научных работах и объектах интеллектуальной собственности отечественных и зарубежных авторов, классических учебных и справочных материалах.

Исследование можно условно разделить на две части. Первая часть посвящена представлению многоуровневой схемы комплексной неразрушающей диагностики теплотехнического состояния ограждающих конструкций объектов строительства и инженерных систем различного назначения по результатам термографирования и качественно-количественного анализа тепловых изображений, а также представлению некоторых результатов натурного тепловизионного обследования светопрозрачных ограждающих конструкций в виде оконных блоков и несветопрозрачных частей навесной вентилируемой фасадной системы объекта завершенного строительства на примере эксплуатируемого административно-производственного здания ЗАО «Вологодский Хлебокомбинат» (рис. 2). Тепловизионная диагностика данного объекта контроля и анализ ее результатов продиктованы необходимостью сокращения потребления энергетических ресурсов и экономией денежных средств ЗАО «Вологодский Хлебокомбинат».

Предложенная схема состоит из трех уровней. На каждом уровне есть пронумерованные последовательные (параллельные) этапы. Последовательная и (или) параллельная реализация предложенных этапов позволяет достичь поставленных целей. Так, на первом уровне представлены примеры светопрозрачных ограждающих и несветопрозрачных навесных вентилируемых фасадных систем объектов капитального и завершенного строительства, результаты термографирования гражданского здания, а также этапы сбора, анализа и обработки информации по контролируемому объекту. Анализ полученных термограмм (на втором и третьем уровнях) позволяет констатировать отсутствие технических и тепловых дефектов в обследуемых строительных конструкциях.

Тепловому контролю подвергались все наружные поверхности ограждающих конструкций обследуемого объекта завершенного строительства. Тепловизионная диагностика выполнялась в холодный период года (февраль 2021 года) тепловизором марки *Testo* 875-2 с соблюдением всех норм и требований, предъявляемым к подобного рода обследованиям [1 – 20, 22, 27, 28, 30, 32].

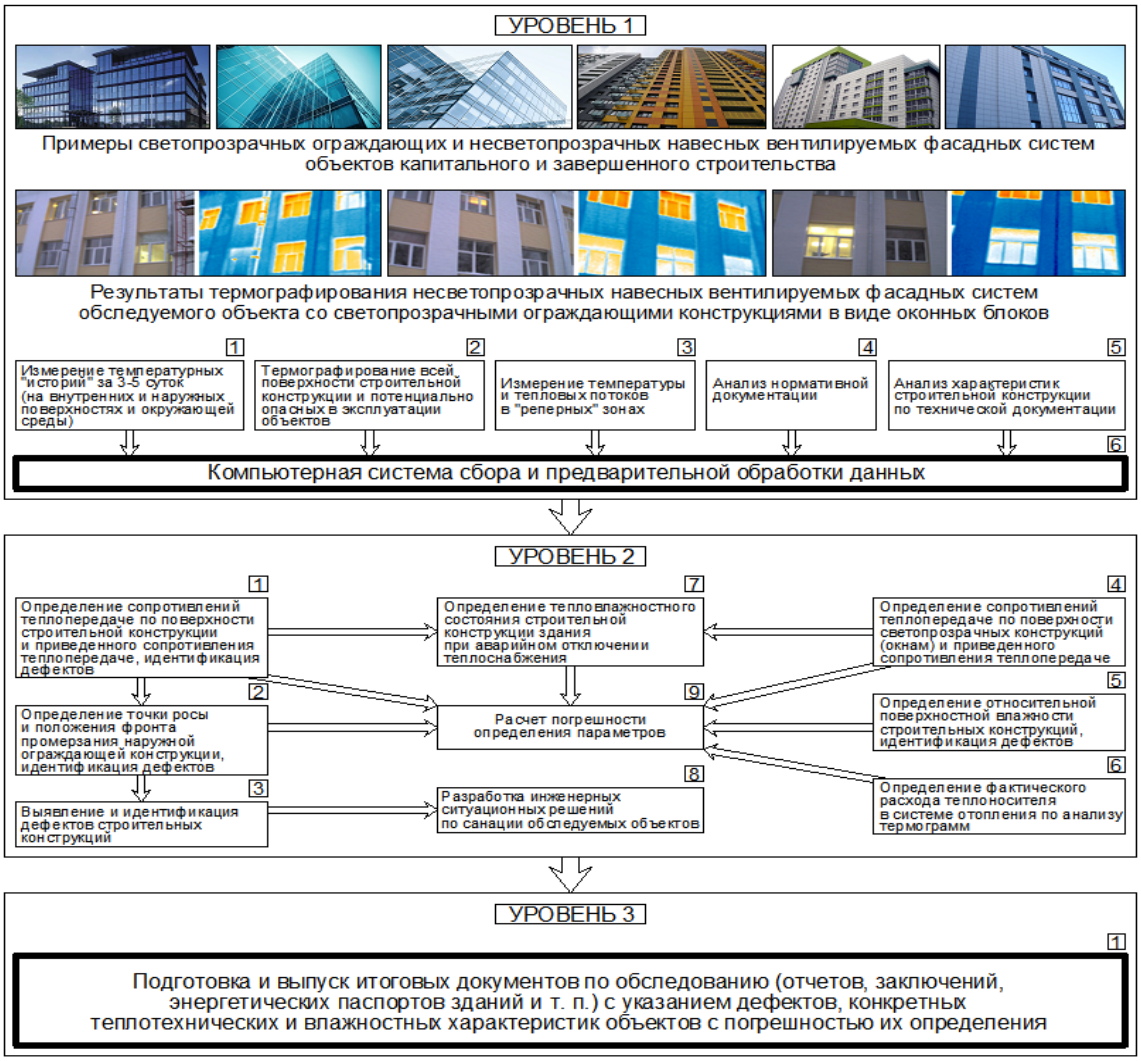


Рис.2.Многоуровневая графо-аналитическая схема, примеры и результаты тепловизионного мониторинга объектов строительства и их структурных элементов по анализу термограмм
Fig. 2. Multi-level graphic-analytical scheme, examples and results of thermal imaging monitoring of construction objects and their structural elements for the analysis of thermograms

Основные технические характеристики используемого тепловизионного контрольно-измерительного оборудования:

1) тип детектора – FPA 160×120, a.Si;
2) температурная чувствительность NETD – < 80 мК при 30 °С;
3) оптическое поле зрения / мин. фокусное расстояние – 32°×23° / 0,1 м (стандартный объектив);
4) частота обновления кадра – 9 Гц;
5) спектральный диапазон – 8…14 μm;
6) размер изображения – 640×480 / 0,4 м;
7) дисплей – ЖК, 3,5”, 320×240;
8) точность измерений – ±2 °С или ±2 % от измер. знач.;
9) диапазон измерений: от –20 °С до 100 °С / от 0 °С до 280 °С (переключаемый);
10) вес / габариты – 900 г / 152×108×262 мм.

Качественный анализ термограмм по результатам тепловизионного мониторинга навесных вентилируемых фасадов ЗАО «Вологодский Хлебокомбинат» не выявил избыточных тепловых потерь в строительной оболочке контролируемого объекта (рис. 2).

Данный факт свидетельствует о высоком качестве монтажных работ по устройству несветопрозрачной навесной вентилируемой фасадной системы и светопрозрачных ограждающих

конструкций в виде оконных блоков, а также других строительных конструкций, элементов, инженерных систем и установок. Идентифицированные в процессе теплового контроля и качественного анализа тепловых изображений незначительные тепловые аномалии рекомендовано устранить (ликвидировать) с помощью утепления (герметизации) современными теплоизоляционными материалами [3, 15].

Методология тепловизионного мониторинга объектов строительства, инженерных систем, строительных материалов, изделий максимально подробно изложена в [2, 11, 14, 19] и реализована в строгом соответствии с ГОСТ Р 8.619-2006 «Приборы тепловизионные измерительные. Методика поверки», ПНСТ 57-2015 «Контроль неразрушающий. Инфракрасная термография. Система и оборудование. Часть 1. Описание характеристик», ГОСТ 34379-2018 «Конструкции ограждающие светопрозрачные. Правила обследования технического состояния в натурных условиях».

Во второй части работы представлена экспериментальная установка, схема, алгоритм реализации и результаты метода активного теплового неразрушающего контроля основных теплофизических свойств – коэффициентов теплопроводности, термического сопротивления и теплопередачи конструкционных строительных материалов и изделий с помощью тепловизора, термографирования и анализа тепловых изображений (рис. 3).

Подобные исследования могут быть реализованы на втором уровне схемы (рис. 1).

Основная идея метода заключается в упрощении технической процедуры и повышении точности определения ключевых теплофизических характеристик (коэффициентов теплопроводности, температуропроводности, термического сопротивления и теплопередачи и др.) строительных материалов и изделий при стационарном тепловом режиме, а также расширении возможностей его применения на исследование теплопроводных качеств неоднородных однослойных строительных конструкций, находящихся, в том числе и в нестационарных температурных условиях [23, 26].

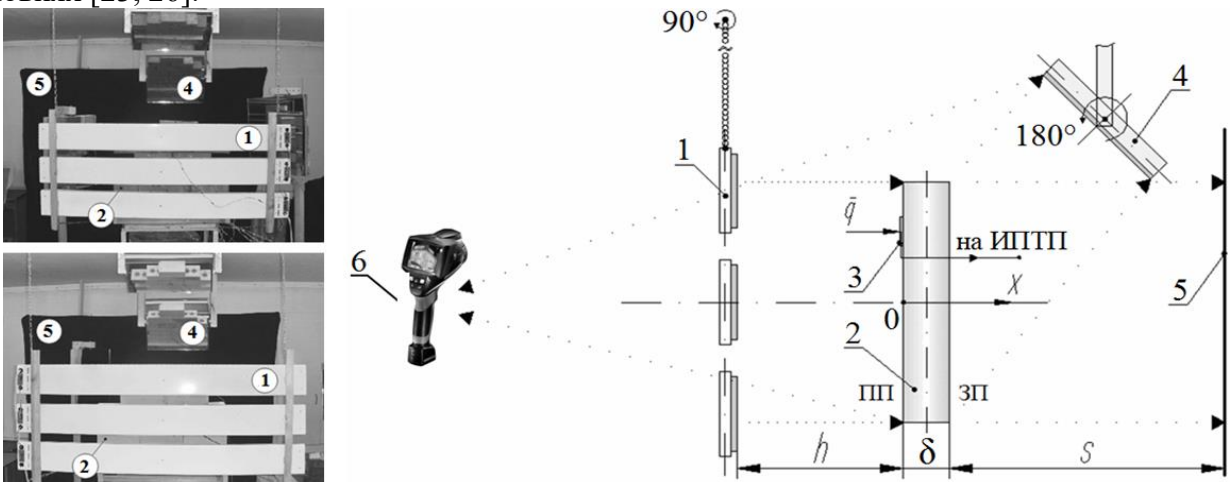


Рис. 3. Внешний вид экспериментальной установки и схема реализации метода активного теплового неразрушающего контроля основных теплофизических свойств строительных материалов и изделий: 1 – источник термостимуляции; 2 – объект контроля; 3 – преобразователь плотности теплового потока; 4 – зеркальный отражатель; 5 – светопоглощающий экран; 6 – тепловизор; ПП и ЗП – передняя и задняя поверхности объекта контроля; ИПТП – измеритель плотности теплового потока

Fig. 3. Appearance of the experimental setup and scheme for implementing the method of active thermal non-destructive testing of the main thermophysical properties of building materials and products: 1 – thermal stimulation source; 2 – object of control; 3 – heat flux density converter; 4 – mirror reflector; 5 – light-absorbing screen; 6 – thermal imager; PP and ZP - front and rear surfaces of the test object; IPTP - heat flux density meter

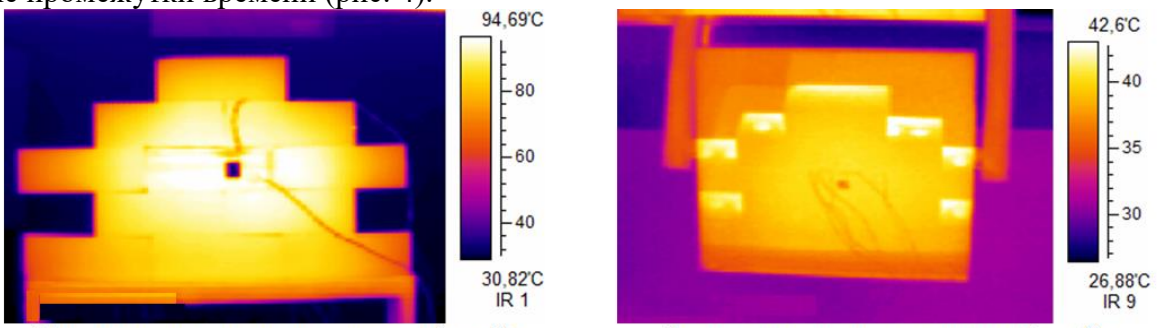
Обсуждение результатов. Рассмотрим краткий алгоритм и пример реализации предложенного метода на фрагменте ограждающей строительной конструкции в виде стенки из сили-

катных кирпичей (кирпич строительный 3-х пустотный М150 по ГОСТ 379-2015 «Кирпич, камни, блоки и плиты перегородочные силикатные»):

1. Тепловая стимуляция стенки источником инфракрасного излучения – электрическими инфракрасными излучателями марки Эколайн ЭЛК 10*R* суммарной мощностью $N = 3$ кВт.

2. Определение времени начала выхода стенки на стационарный тепловой режим τ = 27170 с (экспериментально τ' = 30000 с).

3. Термографирование поверхностей стенки тепловизором *Testo* 875-2 три раза через равные промежутки времени (рис. 4).



Передняя поверхность стенки ($x = 0$) Задняя поверхность стенки ($x = \delta$)

t_{max} = 94,69 °C, t_{min} = 61,45 °C, t_{av} = 78, 07 °C t_{max} = 42,60 °C, t_{min} = 35,50 °C, t_{av} = 39, 05 °C

Рис. 4. Термограммы поверхностей ограждающей строительной конструкции в виде стенки из силикатных кирпичей

Fig. 4. Thermograms of the surfaces of the enclosing building structure in the form of a wall of silicate bricks

4. Определение среднеинтегральных значений температур отдельных участков t_0 передней и t_δ задней поверхностей стенки соответственно (табл.1) в координатах $x = 0$ и $x = \delta$ (рис. 4).

5. Определение коэффициента теплопроводности, термического сопротивления и коэффициента теплопередачи стенки (табл.1).

Выбор термограмм поверхностей ограждающей строительной конструкции в виде стенки из силикатных кирпичей (рис. 4) осуществлен с учетом качества тепловых изображений, дающих максимально полную и точную информацию о температурном поле поверхностей объекта контроля.

Таблица 1. Расчетные значения приведенных коэффициентов теплопроводности, термического сопротивления и теплопередачи фрагмента ограждающей строительной конструкции в виде стенки из силикатных кирпичей

Table 1. Calculated values of the reduced coefficients of thermal conductivity, thermal resistance and heat transfer of a fragment of the enclosing building structure in the form of a wall of silicate bricks

№ п/п	q, Вт/м^2	δ, м	t_0, °C	t_δ, °C	λ_t, Вт/(м·°C)	R, (м^2·°C)/Вт	k, Вт/(м^2·°C)
1	375	0,12	94,4	39,5	0,82	0,146	6,849
2			94,2	38,4	0,81	0,148	6,757
3			94,0	37,2	0,79	0,152	6,579
Средние значения/ Averages $\lambda_{t,\,av}$, Вт/(м·°C), R_{av}, (м^2·°C)/Вт, k_{av}, Вт/(м^2·°C)					0,81	0,148	6,757

Для фрагмента ограждающей строительной конструкции в виде стенки из силикатных кирпичей по результатам расчетов получили среднее значение коэффициента теплопроводности 0,81 Вт/(м·°C).

Данное значение согласуется с нормативной величиной (СП 23-101-2004. Свод правил по проектированию и строительству: Проектирование тепловой защиты зданий), равной 0,82 Вт/(м·°C). Средние значения коэффициентов термического сопротивления и теплопередачи составили соответственно 0,148 (м^2·°C)/Вт и 6,757 Вт/(м^2·°C).

Метод определения основных теплофизических свойств конструкционных строительных материалов и изделий с помощью тепловизионной измерительной техники, позволяет в процессе исследовательских, контрольных, определительных, лабораторных, стендовых, натурных

и эксплуатационных испытаний идентифицировать фактическое значение коэффициентов теплопроводности, термического сопротивления (сопротивления теплопередачи), теплопередачи ограждающих конструкций зданий и сооружений.

Знание указанных величин позволяет количественно оценить теплотехнические свойства ограждающих конструкций объектов капитального и завершенного строительства и их соответствие или несоответствие нормативным требованиям, установить реальные теплопотери через наружные ограждения, проверить расчетные и конструктивные решения [5, 12].

Предложенная экспериментальная установка (рис. 3) позволяет методом активного теплового контроля исследовать и другие теплофизические свойства, как конструкционных, так и современных инновационных тепло- и гидроизоляционных строительных материалов и готовых изделий.

На основании проведенных научно-исследовательских изысканий авторы работы констатируют следующие положения и факты:

1. Тепловой неразрушающий контроль позволяет с высокой степенью технологичности и безопасности проводить оценку и диагностику текущего состояния и потенциала энергосбережения различных объектов строительства и их структурных элементов.

2. Тепловизионное обследование обеспечивает возможность безопасного и непрерывного мониторинга теплового состояния объектов контроля без вывода их из эксплуатации, прогнозирования и выявления дефектов на ранней стадии их развития, сокращение затрат на техническое обследование и т. д.

3. Практический опыт предыдущих аналогичных обследований объектов капитального и завершенного строительства, инженерных систем и подсистем жизнеобеспечения с применением законов и принципов теплового контроля подтвердил – тепловизионный мониторинг является одним из наиболее прогрессивных и востребованных направлений качественной и количественной оценки функционирования различных объектов жилищно-коммунального и топливно-энергетического секторов страны.

4. Предложенная многоуровневая графо-аналитическая схема комплексной диагностики теплотехнического состояния ограждающих конструкций объектов строительства с помощью тепловизора и качественно-количественного анализа термограмм является максимально полной среди известных аналогов и прототипов.

5. Представленный метод активного теплового неразрушающего определения основных теплофизических свойств конструкционных строительных материалов и изделий, также экспериментальная установка для его реализации, позволяют в различных условиях и режимах исследовать весь комплекс теплотехнических характеристик с помощью тепловизора и сопутствующего контрольно-измерительного оборудования.

6. Описанные в работе особенности теплового неразрушающего контроля объекта завершенного строительства на примере административно-производственного гражданского здания и определения основных теплофизических свойств конструкционных материалов и готовых изделий с помощью тепловизионной измерительной техники могут найти широкое практическое применение в решении стратегически важных внутри- и межнациональных вопросов сохранения и роста потенциала энерго- и ресурсосбережения, энергоэффективности, экологической безопасности, охраны окружающей природной среды.

Вывод. В связи с ростом популярности применения тепловизионной и другой измерительной техники, основная идея исследования заключается в представлении некоторых особенностей ее применения в: комплексном тепловом неразрушающем контроле объектов капитального и завершенного строительства, инженерных систем, установок, оборудования различного функционально-технологического и эксплуатационного назначения; качественном анализе тепловых изображений объектов тепловизионного мониторинга с возможностью визуальной идентификации дефектов различной природы происхождения; комплексном определении ключевых теплофизических свойств строительных материалов и изделий, выполняющих конструкционные, несущие, тепло- и гидроизоляционные и другие функции.

Полученные результаты позволяют осуществлять локализацию и последующую количественную оценку теплозащитных оболочек различных эксплуатируемых строительных объектов и их структурных элементов, а также термических характеристик отдельных фрагментов ограждающих конструкций, классических и инновационных теплоизоляционных материалов и изделий, применяемых в них.

Библиографический список:

1. 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.
2. 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.
3. Использование тепловизионной съемки для поиска скрытых дефектов / В. А. Шинкевич, Д. А. Гресь, И. И. Еремеев, Г. Д. Петров // Актуальные проблемы военно-научных исследований. – 2020. – № 6(7). – С. 285-295.
4. 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.
5. Плотников, Е. А. Оценка сокращения тепловых потерь при замене оконного блока на основе данных тепловизионного обследования / Е. А. Плотников, О. В. Руденко // Молодой ученый. – 2020. – № 21(311). – С. 579-580.
6. 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.
7. Аспекты тепловизионного обследования энергооборудования / Р. Б. Гольдман, В. А. Щебетеев, А. В. Ошатинский [и др.] // Colloquium-journal. – 2021. – № 10-1(97). – С. 54-55.
8. 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. – Vol. 9. – No 2. – P. 32. – DOI 10.3390/buildings9020032.
9. 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.
10. 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.
11. Карпов, Д. Ф. Комплексная энергосберегающая диагностика технического состояния ограждающих конструкций объектов капитального строительства и инженерных систем на основе теплового контроля / Д. Ф. Карпов, М. В. Павлов, А. А. Синицын // Научно-технический журнал «Энергосбережение и водоподготовка». – 2020. – № 2 (124). – С. 29-33.
12. 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. – No 3(95). – Pp. 57-65. – DOI 10.18720/MCE.95.6.
13. Карпов, Д. Ф. Некоторые особенности и результаты теплового контроля навесных вентилируемых фасадных систем объектов капитального строительства / Д. Ф. Карпов, М. В. Павлов, А. А. Синицын, Н. Н. Монаркин, А. Г. Гудков // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2020. – Т. 47. – № 1. – С. 147-155. doi:10.21822/2073-6185-2020-47-1-147-155.
14. Thermographic methodologies used in infrastructure inspection: A review-Post-processing procedures / I. Garrido, R. Otero, P. Arias, S. Lagüela // Applied Energy. – 2020. – Vol. 266. – P. 114857. – DOI 10.1016/j.apenergy.2020.114857.
15. Карпов Д. Ф. Применение активного и пассивного теплового контроля в дефектоскопии строительных материалов и изделий, ограждающих конструкций зданий и сооружений // Строительные материалы и изделия, 2019. – Т. 2. – № 4. – С. 39-44.
16. 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.
17. Карпов, Д. Ф. О возможности применения тепловизионной съемки для контроля теплозащитных качеств ограждающих конструкций строительных объектов / Д.Ф. Карпов // XIX Международная молодежная научная конференция «Севергеоэкотех-2018»: материалы конференции (21-23 марта 2018 г.). В 5 ч. Ч. 4. – Ухта: УГТУ, 2019. – С. 111-113.
18. 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.

19. Карпов, Д. Ф. Обзор нормативных и руководящих документов по тепловизионному обследованию зданий и сооружений / Д. Ф. Карпов, М. В. Павлов, Е. Г. Касьянов, В. П. Никулин // Материалы VIII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием 22-23 ноября 2018 г. Часть 2. – Рубцовск: РИИ (филиал) ФГБОУ ВО «АГТУ им. И.И. Ползунова», 2018. – С. 301-306.

20. 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.

21. Milovanović, B. Principal component thermography for defect detection in concrete / B. Milovanović, M. Gaši, S. Gumbarević // Sensors. – 2020. – Vol. 20. – No 14. – P. 1-21. – DOI 10.3390/s20143891.

22. Карпов, Д. Ф. Активный метод теплового контроля теплопроводности строительных материалов и изделий /Д. Ф. Карпов//Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова, 2019. – № 7. – С. 57-62. doi:10.34031/article_5d35d0b79c34c5.75173950.

23. Патент № 2530473 C1 Российская Федерация, МПК G01N 25/18. Устройство и способ комплексного определения основных теплофизических свойств твердого тела : № 2013119005/28 : заявл. 23.04.2013 : опубл. 10.10.2014 / Д. Ф. Карпов, М. В. Павлов, А. А. Синицын [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Вологодский государственный университет» (ВоГУ).

24. Васильева, И. Л. Снижение энергопотребления здания с применением конструкции двойного фасада / И. Л. Васильева, Д. В. Немова, Н. И. Ватин // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. – 2020. – № 3(143). – С. 18-25.

25. Немова, Д. В. Снижение энергопотребления здания с применением конструкции двойного стеклянного фасада / Д. В. Немова, Н. И. Ватин, И. Л. Васильева // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. – 2020. – № 3(14). – С. 17-25.

26. Васильева, И. Л. Внедрение двойных стеклянных фасадов на территории Российской Федерации / И. Л. Васильева, Д. В. Немова, Н. И. Ватин // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2019. – № 9(84). – С. 51-62. – DOI 10.18720/CUBS.84.4.

27. Патент № 2488102 C1 Российская Федерация, МПК G01N 25/18. Способ определения теплопроводности твердого тела активным методом теплового неразрушающего контроля : № 2012106323/28 : заявл. 21.02.2012 : опубл. 20.07.2013 / Д. Ф. Карпов, М. В. Павлов, А. А. Синицын, В. И. Игонин ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Вологодский государственный технический университет» (ВоГТУ).

28. Karpov, D. Determination of surface temperature and moisture fields of structural elements of buildings by thermal imaging / D. Karpov, M. Pavlov, R. Salikhova // Lecture Notes in Civil Engineering. – 2021. – Vol. 141. – Pp. 253-258. https://doi.org/10.1007/978-3-030-67654-4_28.

29. Соловьева, А. А. Исследование развития моделей случайных величин в расчетах надежности строительных конструкций при неполной статистической информации / А. А. Соловьева, С. А. Соловьев // Вестник МГСУ. – 2021. – Т. 16. – № 5. – С. 587-607. – DOI 10.22227/1997-0935.2021.5.587-607.

30. Karpov, D. Thermal method for non-destructive control of actual coolant mass flow through a heating device / D. Karpov D, A. Sinitsyn // ICEPP-2020. E3S Web of Conferences. Vol. 161, 01041 (2020). doi.org/10.1051/e3sconf/202016101041.

31. Соловьева, А. А. Метод оценки надежности элементов плоских ферм на основе p-блоков / А. А. Соловьева, С. А. Соловьев // Вестник МГСУ. – 2021. – Т. 16. – № 2. – С. 153-167. – DOI 10.22227/1997-0935.2021.2.153-167.

32. Karpov D. Algorithm for integrated non-destructive diagnostics of technical condition of structures of buildings and constructions using the thermogram analysis / D. Karpov D, A. Sinitsyn // ICEPP-2020. E3S Web of Conferences. Vol. 161, 01040 (2020). doi.org/10.1051/e3sconf/202016101040.

References:

1. A. I. Bedov, A. I. Gabitov, A. S. Salov Development and features of diagnostics of building structures using thermal imaging. [Stroitel'stvo i rekonstrukciya.] *Construction and reconstruction*. 2020; 1(87): 59-70. – DOI 10.33979/2073-7416-2020-87-1-59-70. (In Russ.).

2. 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.

3. V. A. SHinkevich, D. A. Gres', I. I. Eremeev, G. D. Petrov. The use of thermal imaging to search for hidden defects. [Aktual'nye problemy voenno-nauchnyh issledovanij]. *Actual problems of military scientific research* 2020; 6(7): 285-295. (In Russ.).

4. 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.

5. Plotnikov, E. A. Assessment of the reduction of heat losses when replacing a window block based on thermal imaging survey data [Molodoj uchenyj]. *Young scientist*. 2020; 21(311): 579-580. (In Russ.).

6. 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.

7. Aspects of thermal imaging inspection of power equipment. R. B. Goldman, V. A. Shchebeteev, A.V. Oshatinsky [et al.]. *Colloquium-journal*. 2021;10-1(97): 54-55. (In Russ.).

8. 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.

9. Ignatyuk A. S. Information system of thermal imaging inspection of building structures. A. S. Ignatyuk, S. D. Nikolenko, S. A. Sazonova. [Informacionnye tekhno-logii v stroitel'nyh, social'nyh i ekonomicheskih sistemah] *Information technologies in construction, social and economic systems*. 2021; 2(24): 88-94. (In Russ.)

10. 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;l(. 182):159-171. – DOI 10.1016/j.enbuild.2018.10.017.

11. Karpov D. F. Integrated energy-saving diagnostics of the technical condition of fencing structures of capital construction objects and engineering systems based on thermal control / D. F. Karpov, M. V. Pavlov, A. A. Sinitsy. [Energosberezhenie i vodopodgotovka] *Energy saving and water treatment*. 2020; 2 (124): 29-33. (In Russ.).

12. 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.

13. Karpov D. F. Features of mounted ventilated facade heat control systems in construction projects / D. F. Karpov, M. V. Pavlov, A. A. Sinitsyn, N. N. Monarkin, A. G. Gudkov [Vestnik Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki] *Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences*. 2020; 47(1): 147-155. (In Russ.).

14. 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.

15. Karpov 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; 2(4): 39-44. (In Russ.).

16. 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 MSF: 417-423. – DOI 10.4028/www.scientific.net/MSF.1038.417.

17. Karpov, D. F. About the possibility of using thermal imaging for monitoring thermal qualities of the walling of construction projects / D. F. Karpov // XIX International youth scientific conference “Severgeoteh-2018”: materials of the conference (21-23 March 2018). In 5 parts. Part 4. – Ukhta: Ukhta State Technical University, 2019; 111-113. (In Russ.).

18. 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.

19. Karpov D. F. Review of regulatory and guidance documents for thermal imaging inspection of buildings and structures / D. F. Karpov, M. V. Pavlov, E. G. Kasyanov, V. P. Nikulin // Materials VIII all-Russian scientific and practical conference with international participation 22-23 November 2018. Part 2. – Rubtsovsk: RII (branch) of the Federal state budgetary educational institution of higher education “Altai state technical University. I. I. Polzunova”. 2018; 301-306. (In Russ.)].

20. 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; 2021(4):512-527. – DOI 10.1134/S0036029521040091.

21. 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.

22. Karpov D. F. The active method of control the thermal conductivity of building materials and products [Vestnik BGTU im. V.G. Shuhova] *Bulletin of BSTU named after V. G. Shukhov*, 2019; 7: 57-62. (In Russ.)].

23. Patent No. 2530473 C1 Russian Federation, IPC G01N 25/18. Device and method of complex determination of the basic thermophysical properties of a solid : No. 2013119005/28 : application 23.04.2013 : publ. 10.10.2014 / D. F. Karpov, M. V. Pavlov, A. A. Sinitsyn [et al.] ; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education “Vologda State University” (VoSU). (In Russ.).

24. Vasilyeva, I. L. Reduction of energy consumption of a building using the construction of a double facade / I. L. Vasilyeva, D. V. Nemova, N. I. Vatin. [Vestnik Donbasskoj nacional'noj akademii stroitel'stva i arhitektury] *Bulletin of the Donbass National Academy of Construction and Architecture*. 2020; 3(143): 18-25. (In Russ.)

25. Nemova, D. V. Reduction of energy consumption of a building using the construction of a double glass facade / D. V. Nemova, N. I. Vatin, I. L. Vasilyeva. [ZHilishchnoe ho-zyajstvo i kommunal'naya infrastruktura] *Housing and communal infrastructure*. 2020; 3(14): 17-25. (In Russ.).

26. Vasilyeva, I. L. Introduction of double glass facades on the territory of the Russian Federation / I. L. Vasilyeva, D. V. Nemova, N. I. Vatin.[Stroitel'stvo unikal'nyh zdanij i sooruzhenij] *Construction of unique buildings and structures*. 201; 9(84): 51-62. – DOI 10.18720/CUBS.84.4. (In Russ.).

27. Patent No. 2488102 C1 Russian Federation, IPC G01N 25/18. Method for determining the thermal conductivity of a solid by the active method of thermal non-destructive control : No. 2012106323/28 : application. 02/21/2012 :

publ. 20.07.2013 / D. F. Karpov, M. V. Pavlov, A. A. Sinitsyn, V. I. Igonin ; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education “Vologda State Technical University” (VoGTU). (In Russ.).

28. Karpov, D. Determination of surface temperature and moisture fields of structural elements of buildings by thermal imaging / D. Karpov, M. Pavlov, R. Salikhova. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2021; 141: 253-258. https://doi.org/10.1007/978-3-030-67654-4_28.

29. Solovyova, A. A. Investigation of the development of models of random variables in calculations of reliability of building structures with incomplete statistical information / A. A. Solovyova, S. A. Solovyov. *Vestnik MGSU*. 2021; 16(5): 587-607. – DOI 10.22227/1997-0935.2021.5.587-607. (In Russ.).

30. Karpov D. Thermal method for non-destructive control of actual coolant mass flow through a heating device /D. Karpov D, A. Sinitsyn. ICEPP-2020. E3S Web of Conferences. 2020;161: 01041. doi.org/10.1051/e3sconf/202016101041.

31. Solovyova, A. A. Method for assessing the reliability of elements of flat trusses based on p-blocks / A. A. Solovyova, S. A. Solovyov. *Vestnik MGSU*. 2021;16(2): 153-167. – DOI 10.22227/1997-0935.2021.2.153-167. (In Russ.).

32. Karpov D. Algorithm for integrated non-destructive diagnostics of technical condition of structures of buildings and constructions using the thermogram analysis / D. Karpov D, A. Sinitsyn // ICEPP-2020. E3S Web of Conferences. 2020; 161: 01040 (. doi.org/10.1051/e3sconf/202016101040.

Сведения об авторах:
Карпов Денис Федорович, старший преподаватель; karpovdf@vogu35.ru
Павлов Михаил Васильевич, кандидат технических наук; pavlovmv@vogu35.ru
Гудков Александр Геннадьевич, доцент, кандидат технических наук; gudkovag@vogu35.ru
Information about authors:
Denis F. Karpov, Senior Lecturer, karpovdf@vogu35.ru
Mikhail V. Pavlov, Cand. Sci. (Eng); pavlovmv@vogu35.ru
Alexander G. Gudkov, Cand. Sci. (Eng), Assoc. Prof.; gudkovag@vogu35.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов/The authors declare no conflict of interest.
Поступила в редакцию/ Received 07.10.2021.
Одобрена после рецензирования/ Reviced 25.10.2021.
Принята в печать/Accepted for publication 26.10. 2021.