

DOI: 10.34031/article\_5d35d0b79c34c5.75173950

<sup>1</sup>. \*Карпов Д. Ф.<sup>1</sup>Вологодский государственный университет  
Россия, 160000, Вологда, ул. Ленина, д. 15, каб. 109

\*E-mail: karpov\_denis\_85@mail.ru

## АКТИВНЫЙ МЕТОД ТЕПЛООВОГО КОНТРОЛЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

**Аннотация.** Тепловой контроль относится к методам неразрушающего контроля. Различают пассивный и активный тепловой неразрушающий контроль. При пассивном тепловом контроле объект испытаний характеризуется температурным полем, сформировавшимся в процессе его функционирования. При активном тепловом контроле применяют дополнительный источник тепловой стимуляции контролируемого объекта. Тепловой контроль нашел широкое применение в различных отраслях строительства, энергетики, машиностроения, транспорта. В работе предложен вариант активного теплового неразрушающего контроля коэффициента теплопроводности строительных материалов и изделий на примере фрагмента строительной конструкции из силикатного кирпича. Контролируемый объект подвергают термостимуляции внешним источником тепловой энергии до момента наступления установившегося стационарного теплового режима. Выполняют термографирование поверхностей объекта контроля. Вычисляют среднеинтегральные значения температур поверхностей или отдельных участков объекта контроля. По уравнению теплопроводности определяют контролируемый параметр – коэффициент теплопроводности объекта контроля. При известном коэффициенте теплопроводности вычисляют термическое сопротивление (сопротивление теплопередаче) контролируемого объекта. При известном термическом сопротивлении (сопротивлении теплопередаче) вычисляют коэффициент теплопередаче. Метод реализован в лабораторных условиях. Может применяться в натурных и эксплуатационных условиях для точного и быстрого определения ключевых теплофизических свойств строительных материалов и изделий.

**Ключевые слова:** тепловой контроль, объект контроля, предмет контроля, теплопроводность, коэффициент теплопроводности, термическое сопротивление, тепловая стимуляция, температура, тепловизор, термограмма.

**Введение.** Из-за сложности и большого объема экспериментальных исследований по определению качества, долговечности, надежности и безопасности традиционных и современных строительных материалов и изделий, актуальными и практически значимыми являются вопросы разработки новых и усовершенствования существующих методов и средств теплового контроля (ТК) и технической диагностики (ТД) [1–4]. При помощи методов и средств ТК и ТД можно определять указанные характеристики исследуемых строительных материалов и готовых изделий по теплофизическим свойствам (ТФС) [5, 6], к числу которых относятся: теплопроводность, температуропроводность, теплоемкость, тепловая активность, термостойкость и др. [7].

**Основные термины и определения.** Согласно действующим нормативным документам (национальным стандартам (ГОСТ Р)) дадим определения применяемым в работе терминам [8–11].

Неразрушающий контроль – область науки и техники, охватывающая исследования физических принципов, разработку, совершенствование и применение методов, средств и технологий технического контроля объектов, не разрушающего

и не ухудшающего их пригодность к эксплуатации.

Тепловой неразрушающий контроль – неразрушающий контроль, основанный на регистрации температурных полей контролируемого объекта.

Активный метод теплового неразрушающего контроля – метод теплового неразрушающего контроля, при котором контролируемый объект термостимулируют внешним источником тепловой энергии.

Неконтактная термометрия – совокупность методов и средств измерения температуры, основанных на бесконтактном и дистанционном измерении теплового излучения поверхности контролируемого объекта.

Тепловизор – устройство, предназначенное для наблюдения нагретых контролируемых объектов по их собственному тепловому излучению. Тепловизор преобразует невидимое человеческому глазу инфракрасное излучение в электрические сигналы, которые после усиления и автоматической обработки вновь преобразуются в видимое изображение контролируемых объектов.

Тепловизионная съемка (контроль, обследование, мониторинг) – совокупность технологиче-

ских операций, направленных на измерение температурного поля контролируемого объекта методом неконтактной термометрии с помощью тепловизора с целью обнаружения теплотехнических дефектов.

Термограмма – тепловое изображение контролируемого объекта или его отдельного участка.

Температурное поле – совокупность мгновенных значений температуры во всех точках поверхности объекта контроля или его отдельного участка.

**Цель, достоинства и алгоритм реализации метода.** Целью метода является повышение точности и упрощение технической процедуры определения коэффициента теплопроводности строительных материалов и изделий активным методом теплового неразрушающего контроля при стационарном тепловом режиме, а также расширение возможностей применения данного метода на исследование теплопроводных свойств неоднородных однослойных строительных конструкций [1, 2, 4, 12, 13].

Достоинством метода является бесконтактная дистанционная идентификация температурных полей поверхностей контролируемого объ-

екта, знание которых необходимо для определения коэффициента теплопроводности, как отдельных элементов, так и всей конструкций в целом, независимо от величины ее теплотехнической неоднородности. Условия реализации метода не зависят от внешних факторов окружающей среды и полностью определяются режимом теплообмена между источником тепловой стимуляции и контролируемым объектом. Тепловизор и зеркальный отражатель, в поле зрения которого попадает задняя поверхность контролируемого объекта, позволяют с небольшим интервалом времени, практически одновременно, оценивать температурное состояние обеих поверхностей контролируемого объекта, что понижает погрешность измерений и повышает точность всего эксперимента при реализации метода. Аналитическое выражение для установления начального момента стационарного теплового режима контролируемого объекта имеет простой математический вид, что в свою очередь позволяет существенно сократить время проведения замеров и обеспечить высокую надежность полученных экспериментальных результатов.

Предлагаемый метод реализуется на экспериментальной установке (рис. 1).

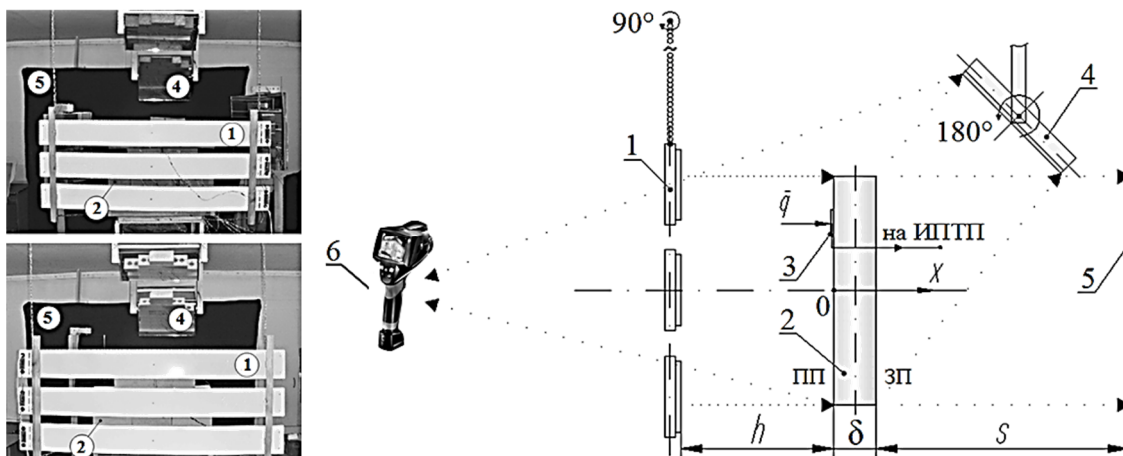


Рис. 1. Внешний вид установки и схема реализации метода: 1 – источник тепловой стимуляции; 2 – объект контроля; 3 – преобразователь плотности теплового потока; 4 – зеркальный отражатель; 5 – светопоглощающий экран; 6 – тепловизор

Алгоритм реализации метода выглядит так:

1. Объект контроля 2 термостимулируют внешним источником тепловой энергии 1 до момента наступления установившегося стационарного теплового режима.

2. По специальному аналитическому выражению вычисляют время  $\tau$ , с, выхода объекта контроля 2 на стационарный тепловой режим:

$$\tau = \delta^2/a, \quad (1)$$

где  $\delta$  – толщина объекта контроля 2, м;  $a$  – температуропроводность объекта контроля 2,  $\text{м}^2/\text{с}$  (предварительно задаются).

3. Выполняют термографирование обеих поверхностей объекта контроля 2 при установившемся стационарном тепловом режиме с момента времени  $\tau$ .

4. Определяют среднеинтегральные значения температур передней поверхности (ПП)  $t_0$  и задней поверхности (ЗП)  $t_\delta$  или отдельных участков объекта контроля 2 соответственно в координатах  $x = 0$  и  $x = \delta$ .

5. Вычисляют коэффициент теплопроводности объекта контроля 2  $\lambda$ ,  $\text{Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$ , по уравнению теплопроводности для плоской стенки при стационарном тепловом режиме:

$$\lambda_r = q\delta / (t_0 - t_\delta), \quad (2)$$

где  $q$  – плотность теплового потока на ПП объекта контроля 2 при  $x = 0$  по данным ИПТП 3, Вт/м<sup>2</sup>;  $\delta$  – толщина объекта контроля 2, м.

6. При известном коэффициенте теплопроводности  $\lambda_r$ , Вт/(м·°C), рассчитывают фактическое термическое сопротивление (сопротивление теплопередаче)  $R$ , (м<sup>2</sup>·°C)/Вт, объекта контроля 2 по аналитическому выражению:

$$R = \delta / \lambda_r, \quad (3)$$

где  $\delta$  – толщина объекта контроля 2, м;  $\lambda_r$  – коэффициент теплопроводности объекта контроля 2, Вт/(м·°C).

**Пример реализации метода.** Метод реализован на фрагменте ограждающей строительной конструкции в виде стенки из силикатных кирпичей (кирпич строительный 3-х пустотный М150 [14]) согласно алгоритму, представленному в предыдущем пункте.

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

2. Согласно [7] предварительно задались коэффициентом температуропроводности силикатного кирпича  $a = 5,3 \cdot 10^{-7}$  м<sup>2</sup>/с. Тогда в соответствии с (1) начало выхода стенки на стационарный тепловой режим  $\tau = 27170$  с (экспериментально  $\tau' = 30000$  с).

3. Выполнено термографирование поверхностей стенки тепловизором Testo 875-2 три раза через равные временные промежутки. Выбор термограмм осуществлен с учетом качества тепловых изображений, дающих максимально полную и точную информацию о температурном поле поверхностей стенки (табл. 1).

4. Определены среднеинтегральные значения температур отдельных участков  $t_0$  ПП и  $t_\delta$  ЗП стенки соответственно в координатах  $x = 0$  и  $x = \delta$  (табл. 2).

5. Рассчитан коэффициент теплопроводности стенки по (2) (табл. 2).

6. Рассчитано термическое сопротивление стенки по (3) (табл. 2).

Таблица 1

Некоторые результаты термографирования поверхностей стенки

x	Термограмма	Температура поверхности
0		$t_{max} = 93,61 \text{ }^\circ\text{C};$ $t_{min} = 60,50 \text{ }^\circ\text{C};$ $t_{av} = 77,60 \text{ }^\circ\text{C}$
$\delta$		$t_{max} = 41,75 \text{ }^\circ\text{C};$ $t_{min} = 35,50 \text{ }^\circ\text{C};$ $t_{av} = 38,63 \text{ }^\circ\text{C}$

Таблица 2

**Расчетные значения коэффициентов теплопроводности и термического сопротивления стенки**

№ п/п	$q$ , Вт/м <sup>2</sup>	$\delta$ , м	$t_0$ , °С	$t_\delta$ , °С	$\lambda_r$ , Вт/(м·°С)	$R$ , (м <sup>2</sup> ·°С)/Вт
1	370	0,12	93,5	39,0	0,81	0,147
2			93,3	38,0	0,80	0,149
3			93,1	36,0	0,78	0,154
Среднее значение $\lambda_{r, av}$ , Вт/(м·°С) и $R_{av}$ , (м <sup>2</sup> ·°С)/Вт					0,80	0,150

По результатам расчетов получили для фрагмента ограждающей строительной конструкции в виде стенки из силикатных кирпичей коэффициент теплопроводности 0,80 Вт/(м·°С), который согласуется с нормативной величиной, равной 0,82 Вт/(м·°С) [15].

**Вывод.** Предложенный метод позволяет в процессе исследовательских, контрольных, определительных, лабораторных, стендовых, натуральных и эксплуатационных испытаний определять фактическое значение коэффициента теплопроводности строительных материалов и изделий, что в свою очередь дает возможность рассчитывать фактическое термическое сопротивление (сопротивление теплопередаче) ограждающих конструкций зданий и сооружений.

Знание величины термического сопротивления (сопротивления теплопередаче) ограждающих конструкций позволяет количественно оценить теплотехнические качества строительных конструкций зданий и сооружений и их соответствие нормативным требованиям, установить реальные потери теплоты через наружные ограждающие конструкции, проверить расчетные и конструктивные решения.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Клюев В.В., Будадин О.Н., Абрамова Е.В. и др. Тепловой контроль композитных конструкций в условиях силового и ударного нагружения. Изд. 1-е. М.: Издательский дом «СПЕКТР». 2017. 200 с.
2. Будадин О.Н., Вавилов В.П., Абрамова Е.В. Тепловой контроль: учеб. пособие. М.: Издательский дом «Спектр». 2013. 176 с.
3. Вавилов В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль. Изд. 2-е, испр. и доп. М.: 2013. 544 с.
4. Вавилов В.П. Тепловидение и тепловой контроль для инженеров. Изд. 1-е. М.: Издательский дом «СПЕКТР». 2017. 72 с.
5. Чернышев В.Н., Однолько В.Г., Чернышев А.В. Методы и системы неразрушающего контроля теплозащитных свойств строительных материалов и изделий. М.: Издательский дом «Спектр». 2012. 200 с.

6. Фокин В.М., Ковылин А.В., Чернышов В.Н. Энергоэффективные методы определения теплофизических свойств строительных материалов и изделий. М.: Издательский дом «Спектр». 2011. 156 с.

7. Коротких А.Г. Теплопроводность материалов: учеб. пособие. Томск. ТПУ. Изд-во Томского политехнического университета. 2011. 97 с.

8. ГОСТ Р 53697-2009. Контроль неразрушающий. Основные термины и определения. Утв. и введ. в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 15.12.2009 г. № 1101-ст. М.: Стандартинформ. 2010. 12 с.

9. ГОСТ Р 56542-2015. Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов. Утв. и введ. в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 07.08.2015 г. № 1112-ст. М.: Стандартинформ. 2015. 16 с.

10. ГОСТ Р 8.619-2006. Приборы тепловизионные измерительные. Методика поверки. Утв. и введ. в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 24.07.2006 г. № 142-ст. М.: Стандартинформ. 2006. 19 с.

11. ПНСТ 57-2015. Контроль неразрушающий. Инфракрасная термография. Система и оборудование. Часть 1. Описание характеристик. Утв. и введ. в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 20.11.2015 г. № 32-пнст. М.: Стандартинформ. 2016. 15 с.

12. George S., Goravar S., Mishra etc. al. Stress monitoring and analysis using lock-in thermography // Insight. 2010. Volume 52. No. 9. Pp. 470–474.

13. Vijayraghavan G.K., Majumder M.C., Ramachandran K.P. NDTE using flash thermography: numerical modelilling and analysis of delaminations in GRP pipes // Insight. 2010. Vol. 52. No. 9. Pp. 481–487.

14. ГОСТ 379-2015. Кирпич, камни, блоки и плиты перегородочные силикатные. Введ. в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 09.04.2015 г. № 246-ст. Взамен ГОСТ 379-95. М.: Стандартинформ. 2015. 22 с.

15. СП 23-101-2004. Свод правил по проектированию и строительству: Проектирование

тепловой защиты зданий. Введ. 01.06.2004 г. М.: ФГУП ЦНС. 2004. 132 с.

Информация об авторах

**Карпов Денис Федорович**, старший преподаватель кафедры теплогазоснабжение и вентиляция. E-mail: karpov\_denis\_85@mail.ru. Вологодский государственный университет. Россия, 160000, Вологда, ул. Ленина, д. 15, каб. 109.

Поступила в феврале 2019 г.

© Карпов Д.Ф., 2019

<sup>1</sup>\***Karpov D.F.**

<sup>1</sup>Vologda State University

Russia, 160000, Vologda, Lenin St., 15, office 109

\*E-mail: karpov\_denis\_85@mail.ru

## THE ACTIVE METHOD OF CONTROL THE THERMAL CONDUCTIVITY OF BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS

**Abstract.** Thermal control refers to non-destructive testing methods. There are passive and active thermal non-destructive testing. With passive thermal control, the test object is characterized by a temperature field formed during its operation. With active thermal control, an additional source of thermal stimulation of the controlled object is used. Thermal control is widely used in various sectors of construction, energy, engineering and transport. The paper proposes a variant of active thermal non-destructive control of thermal conductivity coefficient of building materials and products on the example of a fragment of a building structure made of silicate bricks. The controlled object is subjected to thermal stimulation by an external source of thermal energy until the fixed thermal regime. Thermography of the test object surfaces is performed. The average values of surfaces temperature or individual sections of controlled object are calculated. The heat equation determines a controlled parameter - the heat coefficient of the object under control. The thermal resistance (heat transfer resistance) of the controlled object is calculated with a known coefficient of thermal conductivity. The heat transfer coefficient is calculated with a known coefficient of thermal resistance (heat transfer resistance). The method is implemented in the laboratory. It can be used in field and operating conditions for accurate and rapid determination of the key thermal properties of building materials and products.

**Keywords:** thermal control, object of control, subject of control, thermal conductivity, coefficient of thermal conductivity, thermal resistance, thermal stimulation, temperature, thermal imager, thermography.

### REFERENCES

1. Klyuev V.V., Budadin O.N., Abramova E.V. etc. al. Thermal inspection of composite structures in terms of power and shock loading [*Teplovoj kontrol' kompozitnyh konstrukcij v usloviyah silovogo i udarnogo nagruzheniya*]. Edition 1. M.: Publishing House "SPECTRUM". 2017. 200 p. (rus)
2. Budadin O.N., Vavilov V.P., Abramova E.V. Thermal control: textbook for universities [*Teplovoj kontrol': ucheb. Posobie*]. Edition 2. M.: Publishing House "SPECTRUM". 2013. 176 p. (rus)
3. Vavilov V.P. Infrared thermography and thermal control [*Infrakrasnaya termogra-fiya i teplovoj kontrol'*]. Second edition, revised and enlarged. M.: 2013. 544 p. (rus)
4. Vavilov V.P. Thermal Imaging and thermal control for engineers. First edition. M.: Publishing house "SPECTRUM". 2017. 72 p.
5. Chernyshev V.N., Odnol'ko V.G., Chernyshev A.V. Methods and systems of nondestructive control of heat-shielding properties of building materials and products [*Metody i sistemy nerazrushayushchego*

*kontrolya teplozashchitnyh svoystv stroitel'nyh materialov i izdelij*]. M.: Publishing house "SPECTRUM". 2012. 200 p. (rus)

6. Fokin V.M., Kovylina A.V., Chernyshov V.N. Energy-efficient methods for determining the thermal properties of building materials and products [*Energoeffektivnye metody opredeleniya teplofizicheskikh svoystv stroitel'nyh materialov i izdelij*]. M.: Publishing house "SPECTRUM". 2011. 156 p. (rus)

7. Korotkih A.G. Thermal conductivity of materials. Benefit [*Teploprovodnost' materialov: ucheb. posobie*]. Tomsk. Tomsk Polytechnic University. Publishing house of Tomsk Polytechnic University. 2011. 97 p. (rus)

8. State standard RF 53697-2009. Non-destructive testing. Basic terms and definitions [*Kontrol' nerazrushayushchij. Osnovnye terminy i opredeleniya*]. Approved and put into effect by the Federal Agency for technical regulation and Metrology of 15.12.2009 No. 1101-St. M.: STANDARTINFORM. 2010. 12 p. (rus)

9. State standard RF 56542-2015. Non-destructive testing. Classification of types and methods [Kontrol' nerazrushayushchij. Klassifikaciya vidov i metodov]. Approved and put into effect by the Federal Agency for technical regulation and Metrology 07.08.2015 No. 1112-St. M.: STANDARTINFORM. 2015. 16 p. (rus)

10. State standard RF 8.619-2006. Thermal imaging measuring devices. Calibration procedure [Pribory teplovizionnye izmeritel'nye. Metodika poverki]. Approved and put into effect by the Federal Agency for technical regulation and Metrology dated 24.07.2006, No. 142-St. M.: STANDARTINFORM. 2006. 19 p. (rus)

11. Advanced national standard RF. Non-destructive testing. Infrared thermography. System and equipment. Part 1. A description of the characteristics [Kontrol' nerazrushayushchij. Infrakrasnaya termografiya. Sistema i oborudovanie. Chast' I. Opisaniye harakteristik]. Approved and put into effect by the Federal Agency for technical regulation and Metrology of 20.11.2015 № 32-pnst. M.: STANDARTINFORM. 2016. 15 p. (rus)

12. George S., Goravar S., Mishra etc. al. Stress monitoring and analysis using lock-in thermography. Insight. 2010. Volume 52. No. 9. Pp. 470–474.

13. Vijayraghavan G.K., Majumder M.C., Ramachandran K.P. NDTE using flash thermography: numerical modelilling and analysis of delaminations in GRP pipes. Insight. 2010. Vol. 52. No. 9. Pp. 481–487.

14. State standard. Bricks, stones, blocks and slabs: marble silicate [Kirpich, kamni, bloki i plity peregorodochnye silikatnye]. Promulgated by Order of the Federal Agency for technical regulation and Metrology from 09.04. 2015, No. 246 article to Replace SS 379-95. M.: STANDARTINFORM. 2015. 22 p. (rus)

15. CR 23-101-2004. Code of rules for design and construction: design of thermal protection of buildings [Svod pravil po proektirovaniyu i stroitel'stvu: Proektirovanie teplovoj zashchity zdanij]. Introduced 01.06.2004. M.: Federal state unitary enterprise "Center of methodology of regulation and standardization of construction». 2004. 132 p. (rus)

#### Information about the authors

**Карпов, Denis F.** Senior lecturer. E-mail: karpov\_denis\_85@mail.ru. Vologda State University. Russia, 160000, Vologda, Lenin St., 15, office 109.

---

Received in February 2019

#### Для цитирования:

Карпов Д.Ф. Активный метод теплового контроля теплопроводности строительных материалов и изделий // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 7. С. 57–62. DOI: 10.34031/article\_5d35d0b79c34c5.75173950

#### For citation:

Karpov D.F. The active method of control the thermal conductivity of building materials and products. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. No. 7. Pp. 57–62. DOI: 10.34031/article\_5d35d0b79c34c5.75173950