

Исследование структуры и свойств Structure and properties research

**Физические методы
исследования и контроля**

**Physical methods
of research and monitoring**

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2020-86-2-30-36>

КОНТРОЛЬ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ АДАПТИВНЫМ МЕТОДОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СВЧ-НАГРЕВА

© **Сергей Анатольевич Мордасов, Анастасия Петровна Негуляева*,
Владимир Николаевич Чернышов**

Тамбовский государственный технический университет, Россия, 392019, г. Тамбов, Мичуринская ул., д. 331А;

*e-mail: a.negulyaeva@bk.ru

*Статья поступила 20 мая 2019 г. Поступила после доработки 18 ноября 2019 г.
Принята к публикации 21 ноября 2019 г.*

Возросшая последнее время потребность в оперативных средствах контроля теплофизических характеристик строительных материалов, в том числе синтезируемых с помощью наночастиц, обусловлена ростом стоимости энергоресурсов и актуальностью проблемы ресурсосбережения. Цель работы — разработка метода определения теплофизических характеристик (температуро- и теплопроводности) строительных материалов. Предлагаемый метод основан на измерении температуры в отдельных точках поверхности образца, подвергнутой импульсному тепловому воздействию сфокусированного микроволнового излучения заданной мощности. Количество импульсов и их частота адаптивно устанавливаются микропроцессорной информационно-измерительной системой, с помощью которой реализован метод, при достижении температуры в точке контроля заданного значения. Необходимая точность метода обеспечена за счет контроля высоких значений температур, снятия информации в частотно-импульсной форме и прогрева большого объема исследуемого материала. Исследовали образцы таких строительных материалов, как керамзитный бетон, силикатный и красный кирпичи. Полученные данные сравнивали с теплофизическими характеристиками образцов, определенными на поверенных приборах ИТ-А-400 в лабораторных условиях. Установили, что предлагаемый метод имеет ряд преимуществ перед традиционными подходами и достаточную для теплофизических измерений точность. Это позволяет применять его в различных областях промышленности и строительной теплотехнике.

Ключевые слова: неразрушающий контроль; температуро- и теплопроводность; микроволновый нагрев; строительная теплотехника; микропроцессорная система.

CONTROL OF THE THERMOPHYSICAL CHARACTERISTICS OF BUILDING MATERIALS BY THE ADAPTIVE METHOD USING MICROWAVE HEATING

© **Sergej A. Mordasov, Anastasiya P. Negulyaeva*, Vladimir N. Chernyshov**

Tambov State Technical University, 331A Michurinskaya ul., Tambov, 392019, Russia; e-mail: a.negulyaeva@bk.ru

Received May 20, 2019. Revised November 18, 2019. Accepted November 21, 2019.

An increase in the cost of energy resources and urgent character of the problem of resource conservation entails the necessity of developing means of operational control of the thermophysical characteristics of building materials, including those synthesized using nanoparticles. The goal of the study is developing of the new method for determining the thermophysical characteristics (thermal diffusivity and thermal conductivity) of building materials. The method for determining the thermophysical characteristics proposed in this article consists in measuring the temperature in two points on the sample surface subjected to ther-

mal pulsed impact of focused microwave radiation of the given power. The number of pulses and their frequency are adaptively set by the microprocessor information-measuring system, with which the method is implemented when the temperature is reached at the setpoint control point. To implement the method, a microprocessor information-measuring system is presented. The accuracy of the proposed method is improved by controlling high temperature values, taking information in a pulse-frequency form and heating a large bulk of the material under study. The samples of clay, concrete, silicate and red brick are studied. The data obtained were compared with the results of traceable measurements of the thermophysical characteristics of the samples, using IT-λ-400 devices under laboratory conditions. The experiments showed that the developed method has several advantages compared to other traditional methods and accuracy sufficient for thermophysical measurements. The method can be used in various fields of industry and thermal engineering for construction.

Keywords: non-destructive testing; thermal diffusivity; thermal conductivity; microwave heating; thermal engineering for construction; microprocessor system.

Введение

В строительной теплотехнике в связи с постоянно растущей стоимостью энергоносителей остро стоит проблема энергосбережения при строительстве и эксплуатации зданий и сооружений. Для уменьшения теплопотерь при эксплуатации строительных объектов все больший удельный вес приобретают синтезированные материалы, которые по своим теплозащитным свойствам имеют значительные преимущества перед естественными материалами. Кроме того, быстро-растущая область нанотехнологий позволяет создавать наномодифицированные строительные материалы на основе традиционных бетона, керамзитобетона, кирпича, керамики и др. с использованием добавок наноконпонентов. Теплофизические и прочностные свойства таких материалов существенно меняются (иногда в разы) при значительном повышении качества [1 – 6].

Одни из наиболее быстроразвивающихся методов неразрушающего контроля теплофизических характеристик (ТФХ) строительных материалов — микроволновые (диэлькометрические) методы, использующие сверхвысокочастотное (СВЧ) электромагнитное излучение. Они основаны на зависимости изменения температуры на поверхности исследуемого объекта от ТФХ при поглощении локализованным объемом материала определенной дозы микроволнового излучения [7 – 9].

Теоретическое описание воздействия электромагнитных волн микроволнового диапазона на диэлектрические объекты, к которым относятся большинство строительных материалов, хорошо изучено. Использование энергии электромагнитного поля СВЧ-диапазона для нагрева исследуемых объектов позволяет получить интегральные и усредненные по объему значения ТФХ, а следовательно, — более точную и достоверную информацию о теплозащитных свойствах материалов [10 – 12].

Цель работы — разработка метода контроля ТФХ строительных материалов с использова-

нием СВЧ-нагрева поверхности исследуемого объекта.

Методика, материалы, оборудование

Поскольку традиционные строительные материалы (кирпич, бетон и др.) — диэлектрики, то под воздействием высокочастотного электромагнитного излучения СВЧ-диапазона они нагреваются. Удельная мощность рассеяния излучения в исследуемом объекте определяется выражением [13]

$$P = 0,556 \cdot 10^{-12} \epsilon_m E^2 f, \quad (1)$$

где E — напряженность переменного электрического поля; f — частота СВЧ-излучения; ϵ_m — диэлектрическая проницаемость исследуемого материала.

Как известно, электромагнитная волна в диэлектрике ослабляется в соответствии с зависимостью

$$\Delta P = P[1 - \exp(-2\alpha z)], \quad (2)$$

где z — глубина проникновения волны;

$$\alpha = \frac{\pi \epsilon''_{cm}}{\gamma \sqrt{\epsilon'_{cm}}} — \quad (3)$$

коэффициент затухания (γ — длина волны; ϵ'_{cm} и ϵ''_{cm} — действительная и мнимая составляющие диэлектрической проницаемости смеси воды и исследуемого материала).

Из (1) и (2) видно, что глубина проникновения электромагнитного поля СВЧ-диапазона, а следовательно, и скорость рассеяния (потерь) по глубине диэлектрика в наибольшей степени зависят от частоты СВЧ-излучения.

На рис. 1 приведена зависимость относительной мощности электромагнитной волны от глубины проникновения в диэлектрик при различных частотах СВЧ-излучения. Видно, что при электромагнитном излучении с частотой не ме-

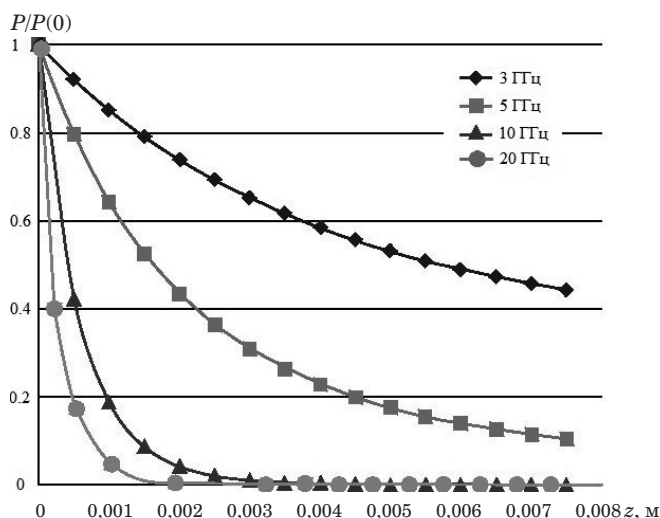


Рис. 1. Зависимость относительной мощности электромагнитной волны $P/P(0)$ от глубины проникновения в диэлектрик z

Fig. 1. Dependence of the relative power of an electromagnetic wave $P/P(0)$ on the depth z of wave penetration into the dielectric

нее 20 ГГц практически вся тепловая мощность выделяется в приповерхностном слое глубиной 1 – 2 мм.

Предлагаемый метод заключался в следующем. На поверхность исследуемого объекта воздействовали импульсом (длительность — 2 – 3 с) высокочастотного электромагнитного поля частотой не менее 20 ГГц. Длину линии (не менее 8 – 10 см) микроволнового воздействия задавали на порядок больше, чем расстояние от нее до точек контроля температур. В этом случае концевые эффекты, обусловленные ограниченностью длины этой линии, не влияли на контролируемое температурное поле. Встроенная в антенну линза из радиопрозрачного диэлектрического материала дала возможность получить антенну с заданной диаграммой направленности [14].

После подачи импульса заданной мощности определяли интервал времени $\tau_{\text{рел}}$ от начала воздействия до момента, когда температура в точке контроля на расстоянии x_1 от линии действия СВЧ-импульса становилась равной первоначальной температуре $T_0 \pm \varepsilon$ (ε — порог чувствительности измерительной аппаратуры). Иными словами, определяли время релаксации температурного поля в точке x_1 (рис. 2).

Минимальную частоту подачи импульсов находили из соотношения $F_{\min} = k/\tau_{\text{рел}}$ (k — коэффициент, задаваемый в диапазоне 2 – 5).

Тепловое воздействие от линейного источника тепла осуществляли, увеличивая частоту тепловых импульсов в соответствии с формулой

$$F_{\text{имп}} = F_{\min} + K_1 T_i +$$

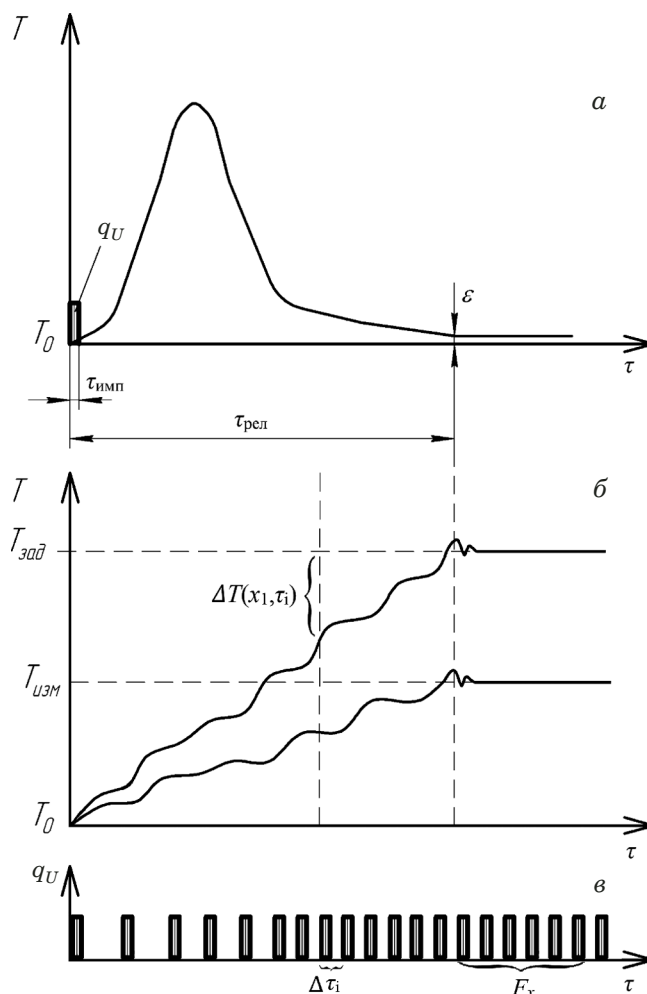


Рис. 2. Термограммы нагрева (a — одиночный импульс; b — квазистационарный тепловой поток) и серия тепловых импульсов ($в$)

Fig. 2. Heating thermograms (a — single pulse; b — a quasi-stationary heat flux) and series of thermal pulses (c)

$$+ \frac{1}{K_2} \int_{\tau_{i-1}}^{\tau_i} \Delta T(\tau) d\tau + K_3 \left. \frac{d[\Delta T(\tau)]}{d\tau} \right|_{\tau=\tau_i}, \quad (4)$$

где $\Delta T(\tau) = T_{\text{зад}} - T(x_1, \tau)$ — разность между заранее заданным значением $T_{\text{зад}}$, установившимся в точке x_1 , и текущим значением контролируемой температуры; $\Delta T_i = T_{\text{зад}} - T(\tau_i)$ — разность между заданной и текущей температурой в моменты времени, определяемые соотношением $\tau_i = K_4 \sum_{k=1}^{i-1} \Delta T_k$, $K_1, \dots, K_4$ — коэффициенты

пропорциональности, задаваемые в диапазонах: $K_1 = 1 - 10$; $K_2 = 1 - 100$; $K_3 = 1 - 50$; $K_4 = 0,1 - 1$.

Частоту тепловых импульсов увеличивали до тех пор, пока значение температуры в точке контроля не достигало заданного значения $T_{\text{зад}}$, т.е. $\Delta T_i = T_{\text{зад}} - T(\tau_i) = 0$. Это происходило тогда, ко-

гда очередной тепловой импульс, подаваемый линейным источником, менял температуру в точке на величину, меньшую порога чувствительности ε измерений температуры ($\varepsilon \leq 0,01^\circ\text{C}$).

Как известно, процесс распространения тепла на теплоизолированной от внешней среды поверхности полубесконечного в тепловом отношении тела при действии линейного источника тепла описывается решением уравнения теплопроводности, которое имеет вид [15]

$$T(x, \tau - \tau_i) = \sum_{i=1}^n \frac{q_{\text{и}}}{2\pi\lambda(\tau - \tau_i)} \exp\left[-\frac{x^2}{4a(\tau - \tau_i)}\right], \quad (5)$$

где x — расстояние от линейного источника тепла до точки контроля; τ — время; τ_i — момент подачи i -го теплового импульса на поверхность тела; λ — коэффициент теплопроводности изделия; $q_{\text{и}}$ — количество тепла, выделяемое с единицы длины линейного источника; a — коэффициент температуропроводности.

При подаче одного импульса изменение температуры в точке контроля определяется соотношением

$$T(x, \tau) = \frac{q_{\text{и}}}{2\pi\lambda\tau} \exp\left(-\frac{x^2}{4a\tau}\right). \quad (6)$$

Используя (5), по заданной величине ε из соотношения

$$\frac{q_{\text{и}}}{\pi\lambda\tau} \exp\left(-\frac{x^2}{4a\tau}\right) = \varepsilon$$

находим интервал времени релаксации температурного поля $\tau_{\text{рел}}$ в точке на расстоянии x_1 от воздействия теплового импульса мощностью $q_{\text{и}}$. Полученный интервал $\tau_{\text{рел}}$ определяет количество импульсов, влияющих на установившуюся температуру в точке контроля в момент измерения τ .

Количество импульсов, подаваемых на интервале $\tau_{\text{рел}}$ с частотой F , составляет

$$n = E(\tau_{\text{рел}}F), \quad (7)$$

где $E(y)$ — функция целой части числа y .

В результате действия серии импульсов в точках контроля x_1 и x_2 на основании (7) $T_{\text{зад}}$ и $T_{\text{изм}}$, установившиеся в x_1 и x_2 , будут определяться соотношениями

$$T_{\text{зад}} = \frac{q_{\text{и}}F_x}{2\pi\lambda} \sum_{i=1}^n \frac{1}{i} \exp\left(-\frac{x_1^2}{4a\Delta\tau}\right), \quad (8)$$

$$T_{\text{изм}} = \frac{q_{\text{и}}F_x}{2\pi\lambda} \sum_{i=1}^n \frac{1}{i} \exp\left(-\frac{x_2^2}{4a\Delta\tau}\right), \quad (9)$$

где $\Delta\tau = 1/F_x$ — интервал времени между передними фронтами тепловых импульсов.

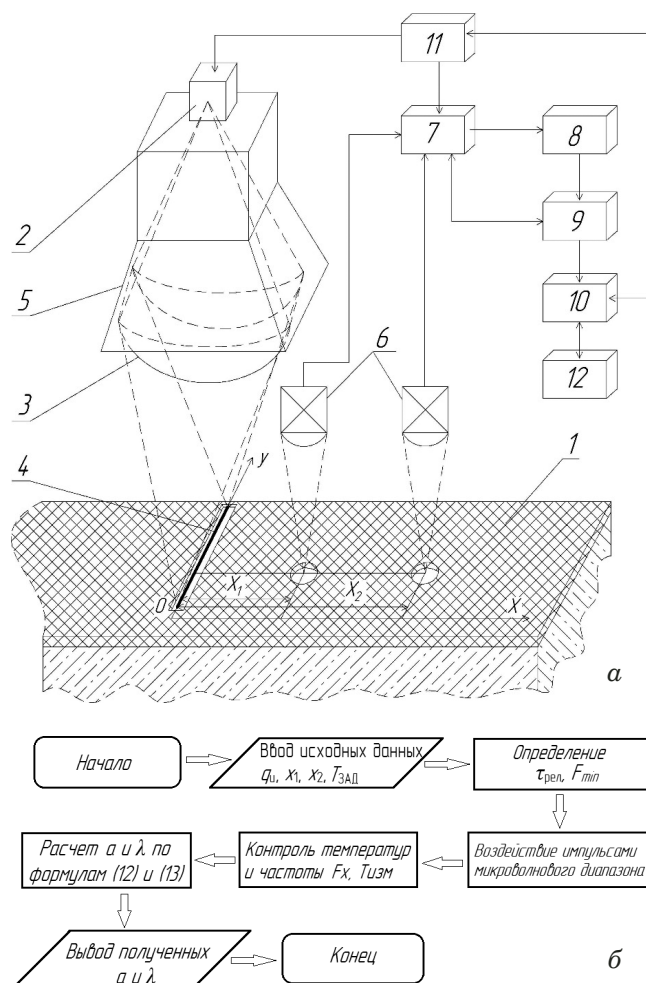


Рис. 3. Блок-схемы ИИС (а) и процесса ее работы (б)

Fig. 3. Block diagrams of the microprocessor-based control system (a) and operation process (b)

Для решения системы (8) – (9) относительно a и λ воспользуемся разложением в ряд $e^x = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{x^i}{i!}$. Поскольку x_1 и x_2 малы (не более 0,001 – 0,005 м), ограничимся в разложении двумя слагаемыми:

$$T_{\text{зад}} = \frac{q_{\text{и}}F_x}{2\pi\lambda} \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{i} - \frac{x_1^2 F_x}{4a} \sum_{i=1}^n \frac{1}{i^2} \right), \quad (10)$$

$$T_{\text{изм}} = \frac{q_{\text{и}}F_x}{2\pi\lambda} \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{i} - \frac{x_2^2 F_x}{4a} \sum_{i=1}^n \frac{1}{i^2} \right). \quad (11)$$

Поделив (10) на (11), получаем выражение для коэффициента температуропроводности

$$a = F_x \frac{\left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{i^2} \right) \left(\frac{T_{\text{зад}}}{T_{\text{изм}}} x_2^2 - x_1^2 \right)}{4 \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{i} \right) \left(\frac{T_{\text{зад}}}{T_{\text{изм}}} - 1 \right)}. \quad (12)$$

Подставляя в (8) найденный коэффициент температуропроводности, находим коэффициент теплопроводности

$$\lambda = \frac{q_n F_x}{2\pi T_{\text{зад}}} \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{i} - \frac{x_1^2 F_x}{4a} \sum_{i=1}^n \frac{1}{i^2} \right). \quad (13)$$

Исследовали образцы таких строительных материалов, как красный и силикатный кирпич, керамзитный бетон. Для реализации метода использовали микропроцессорную информационно-измерительную систему (ИИС) (рис. 3).

Исследуемый образец 1 нагревали с помощью импульсного воздействия высокочастотного электромагнитного поля по линии 4 заданного размера. Излучающая антенна 5 с вмонтированной в нее линзой 3 соединялась с СВЧ-генератором 2. После микроволнового воздействия осуществляли контроль температуры на теплоизолированной от окружающей среды поверхности исследуемого объекта в двух точках, находящихся соответственно на расстоянии x_1 и x_2 (обычно 2 и 5 мм) от линии электромагнитного воздействия. Для этого использовали бесконтактные первичные измерительные преобразователи (ПИП) температуры инфракрасного диапазона 6, сфокусированные на поверхность исследуемого объекта.

ПИП через коммутатор 7, нормирующий прецизионный усилитель 8 и аналого-цифровой преобразователь (АЦП) 9, подключали к микропроцессору 10. Микропроцессор соединяли через порт ввода-вывода 11 с СВЧ-генератором и коммутатором, который осуществлял подключение ПИП в соответствии с разработанным на основе предложенного метода алгоритмом. Полученные данные выводились на индикатор 12. С их помощью исковые теплофизические характеристики рассчитывали с использованием соотношений (12) и (13), описывающих тепловые процессы в полуограниченном в тепловом отношении объекте.

Образцы строительных материалов нагревали при температуре окружающей среды $20 \pm \pm 2$ °С. Поверхность исследуемого образца теплоизолировали от окружающей среды, исключая линию теплового воздействия и точки контроля температуры x_1 и x_2 (в теплоизоляционном покрытии присутствовали щель для линейного нагрева и отверстия для фокусировки бесконтактных ПИП).

Обсуждение результатов

В таблице приведены результаты определений ТФХ исследуемых образцов с использованием поверенных приборов ИТ-Л-400 (при расчете

ТФХ строительных материалов

The thermophysical characteristics of building materials

$\tau_{\text{ред}}, \text{ с}$	$F_x, 10^{-2} \text{ Гц}$	$T_{\text{зад}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{изм}}, ^\circ\text{C}$	Метод						Погрешность предложенного метода	
				Традиционный [14]		Предлагаемый		Справочные данные [1, 16]			
				$\alpha, 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$	$\lambda, \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$	$\alpha, 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$	$\lambda, \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$	$\alpha, 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$	$\lambda, \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$	$\Delta\alpha/\alpha, \%$	$\Delta\lambda/\lambda, \%$
Красный кирпич											
484	8,3	40	28,75	0,395	0,724	0,389	0,710	0,362	0,657	7,46	8,07
482	7,1	40	27,87	0,397	0,721	0,337	0,706	0,362	0,657	6,91	7,60
485	7,6	40	27,93	0,396	0,719	0,331	0,702	0,362	0,657	8,56	6,85
481	8,0	40	29,01	0,394	0,723	0,385	0,702	0,362	0,657	6,35	6,85
483	7,6	40	29,04	0,396	0,720	0,394	0,705	0,362	0,657	8,84	7,31
Силикатный кирпич											
442	12,5	40	27,40	0,611	0,797	0,512	0,774	0,558	0,721	6,27	7,35
438	11,2	40	26,69	0,614	0,790	0,514	0,778	0,558	0,721	7,89	7,91
441	12,2	40	27,11	0,615	0,795	0,513	0,765	0,558	0,721	8,06	6,10
439	11,1	40	27,00	0,619	0,787	0,511	0,768	0,558	0,721	8,42	6,52
443	11,8	40	26,73	0,617	0,792	0,508	0,775	0,558	0,721	8,96	7,49
Керамзитный бетон											
697	7,7	45	32,05	0,312	0,623	0,264	0,602	0,283	0,562	6,71	7,12
703	6,9	45	31,26	0,315	0,625	0,258	0,612	0,283	0,562	8,83	8,90
702	6,7	45	32,11	0,313	0,621	0,263	0,600	0,283	0,562	7,07	6,76
704	7,4	45	31,75	0,316	0,620	0,262	0,603	0,283	0,562	7,72	7,83
698	7,1	45	31,98	0,317	0,624	0,259	0,599	0,283	0,562	8,48	6,58

погрешности справочные данные принимали за эталонные).

Примененный адаптивный поиск оптимального теплового воздействия позволяет сохранить целостность исследуемого объекта, так как в этом случае нагрев осуществляется до заранее заданной температуры (на 20 – 30 % ниже температуры термодеструкции исследуемого материала). Кроме того, в предложенном методе контролируются высокие по уровню значения температуры, что повышает точность температурно-временных измерений. Информация, снимаемая в частотно-импульсной форме (при традиционных способах — в аналоговой), легко преобразовывается в цифровой вид. Это существенно уменьшает долю случайной составляющей общей погрешности измерений за счет снижения воздействия на информативный параметр случайных помех. За счет частотно-импульсного нагрева тепловому воздействию подвергается большой объем исследуемого материала (температурное поле формируется вследствие прогрева большого объема образца). А поскольку строительные материалы чаще всего неоднородны, дисперсны и анизотропны, то такой прогрев дает возможность получить интегральное и усредненное по объему значение контролируемой температуры, что также повышает точность определения искомых ТФХ. В итоге точность результатов возрастает в среднем на 2 – 3 %.

Заключение

Таким образом, проведенные исследования показали, что предложенный метод имеет ряд существенных преимуществ в точности определения ТФХ перед традиционными методами. Это дает возможность успешного его применения в практике теплофизических измерений, строительной теплотехнике и различных отраслях промышленности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Клюев В. В. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий. Справочник. — М.: Машиностроение, 1976. — 182 с.
2. Чернышов А. В., Иванов Г. Н. Метод неразрушающего контроля теплофизических свойств многослойных теплозащитных покрытий и изделий / Контроль. Диагностика. 2007. № 6(108). С. 50 – 54.
3. Чернышова Т. И., Чернышов В. Н. Методы и средства неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов. — М.: Машиностроение, 2001. — 240 с.
4. Головин Ю. И. и др. Новый подход и экспресс-метод определения кинетических теплофизических характеристик материалов / Информационно-сенсорные системы в теплофизических исследованиях: сб. науч. статей. — Тамбов: ТГТУ, 2018. С. 193 – 195.
5. Чернышов А. В. Метод неразрушающего контроля теплофизических характеристик многослойных изделий / Контроль. Диагностика. 2003. № 6. С. 40 – 44.

6. Артюхина Е. Л., Пономарев С. В. Технические средства контроля теплопроводности твердых неметаллических материалов / Труды ТГТУ. 2008. № 21. С. 87 – 89.
7. Голиков Д. О., Чернышов А. В., Жарикова М. В. Микроволновый метод и измерительная система неразрушающего контроля теплофизических характеристик строительных материалов / Проблемы техногенной безопасности и устойчивого развития: сб. науч. ст. — Тамбов: ТГТУ, 2011. С. 230 – 234.
8. Чернышов В. Н., Жарикова М. В., Чернышов А. В. Микроволновый метод неразрушающего контроля теплофизических характеристик строительных материалов / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2018. Т. 84. № 10. С. 29 – 34. DOI: 10.26896/1028-6861-2018-84-10-29-34.
9. Чернышов В. Н., Чернышова Т. И. Методы и информационно-измерительные системы неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов и изделий. — СПб.: Экспертные решения, 2016. — 384 с.
10. Пономарев С. В., Дивин А. Г. Применение математического моделирования и оптимизации при проектировании и модернизации методов и устройств для теплофизических измерений / Современные методы и средства исследования теплофизических свойств веществ: материалы конференции. — СПб.: ИТМО, 2017. С. 13 – 14.
11. Селиванова З. М., Куренков Д. С. Моделирование измерительных сигналов интеллектуальной информационно-измерительной системы дистанционного контроля теплофизических свойств твердых материалов / Информационно-сенсорные системы в теплофизических исследованиях: сб. науч. статей. Т. 1. — Тамбов: ТГТУ, 2018. С. 308 – 311.
12. Ponomarev S. V., Divin A. G. Mathematical methods of metrology and optimization application in the design and modernization of techniques and devices for thermophysical measurements / 27th International scientific symposium “Metrology and metrology assurance 2017”. Proceedings of the symposium. — Sozopol: Technical University of Sofia, 2017. P. 112 – 114.
13. Пюшнер Г. Нагрев энергией сверхвысоких частот. — М.: Энергия, 1968. — 312 с.
14. Пат. 2399911 РФ, МПК G 01 N 25/18. Способ определения теплофизических характеристик строительных материалов (варианты) / Чернышов В. Н., Голиков Д. О., Чернышов А. В.; заявитель и патентообладатель ТГТУ. — № 2008145926/28; заявл. 20.11.2008; опубл. 20.09.2010, Бюл. № 26.
15. Лыков А. В. Теория теплопроводности. — М.: Высшая школа, 1967. — 599 с.
16. Франчук А. У. Таблицы теплотехнических показателей строительных материалов. — М.: НИИ строительной физики, 1969 г. — 144 с.

REFERENCES

1. Klyuev V. V. Devices for non-destructive testing of materials and products. Directory. — Moscow: Mashinostroenie, 1976. — 182 p. [in Russian].
2. Chernyshov A. V., Ivanov G. N. Method of non-destructive testing of thermophysical properties of multilayer heat-shielding coatings and products / Kontrol. Diagn. 2007. N 6(108). P. 50 – 54 [in Russian].
3. Chernyshova T. I., Chernyshov V. N. Methods and means of non-destructive testing of thermophysical properties of materials. — Moscow: Mashinostroenie, 2001. — 240 p. [in Russian].
4. Golovin Yu. I. et al. A new approach and a rapid method for determining the kinetic thermal characteristics of materials / Information-sensory systems in thermophysical research: a collection of scientific articles. — Tambov: TGTU, 2018. P. 193 – 195 [in Russian].
5. Chernyshov A. V. Method of non-destructive testing of thermal characteristics of multilayer products / Kontrol. Diagn. 2003. N 6. P. 40 – 44 [in Russian].
6. Artyuhina E. L., Ponomarev S. V. Technical means of controlling the thermal diffusivity of solid non-metallic materials / Trudy TGTU. 2008. N 21. P. 87 – 89 [in Russian].

7. **Golikov D. O., Chernyshov A. V., Zharikova M. V.** Microwave method and measuring system for non-destructive testing of thermophysical characteristics of building materials / Problems of technological safety and sustainable development: a collection of scientific articles. — Tambov: TGTU, 2011. P. 230 – 234 [in Russian].
8. **Chernyshov V. N., Zharikova M. V., Chernyshov A. V.** Microwave method of nondestructive testing of the thermal characteristics of building materials / *Zavod. Lab. Diagn. Mater.* 2018. Vol. 84. N 10. P. 29 – 34. DOI: 10.26896/1028-6861-2018-84-10-29-34.
9. **Chernyshov V. N., Chernyshova T. I.** Methods and information-measuring systems for non-destructive testing of the thermophysical properties of materials and products. — St. Petersburg: Ekspertnye resheniya, 2016. — 384 p. [in Russian].
10. **Ponomarev S. V., Divin A. G.** Application of mathematical modeling and optimization in the design and modernization of methods and devices for thermophysical measurements / Modern methods and means of studying the thermophysical properties of substances: conference proceedings. — St. Petersburg: ITMO, 2017. P. 13 – 14 [in Russian].
11. **Selivanova Z. M., Kurenkov D. S.** Simulation of measuring signals of an intellectual information-measuring system for remote control of the thermophysical properties of solid materials / Information-sensory systems in thermophysical research: a collection of scientific articles. Vol. 1. — Tambov: TGTU, 2018. P. 308 – 311 [in Russian].
12. **Ponomarev S. V., Divin A. G.** Mathematical methods of metrology and optimization application in the design and modernization of techniques and devices for thermophysical measurements / 27th International scientific symposium “Metrology and metrology assurance 2017”. Proceedings of the symposium. — Sozopol: Technical University of Sofia, 2017. P. 112 – 114.
13. **Pyushner G.** Heating energy ultra-high frequency. — Moscow: Énergiya, 1968. — 312 p. [in Russian].
14. Pat. 2399911 RF, IPC G 01 N 25/18. Method for determining the thermal characteristics of building materials (options) / Chernyshov V. N., Golikov D. O., Chernyshov A. V.; applicant and patent holder TSTU. — N 2008145926/28; appl. 20.11.2008; publ. 20.09.2010. Byull. N 26.
15. **Lykov A. V.** Theory of heat conduction. — Moscow: Vysshaya shkola, 1967. — 599 p. [in Russian].
16. **Franchuk A. U.** Tables of heat engineering indicators of building materials. — Moscow: NII Stroitel'noi fiziki, 1969. — 144 p. [in Russian].