

МИКРОВОЛНОВЫЙ МЕТОД И РЕАЛИЗУЮЩАЯ ЕГО СИСТЕМА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

Д. Ю. Остроухов^{1✉}, Т. И. Чернышова², В. Н. Чернышов¹

*Кафедры: «Уголовное право и прикладная информатика в юриспруденции» (1),
Denistambov359@gmail.com; «Конструирование радиоэлектронных
и микропроцессорных систем» (2), ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия*

Ключевые слова: адаптивная информационно-измерительная система; анализ источников погрешностей; подвижный СВЧ-источник тепла; тепло- и теплопроводность; тепловые потери от лучистого и конвективного теплообмена.

Аннотация: Предложены метод и реализующая его измерительно-управляющая система определения теплофизических характеристик (тепло- и теплопроводности) материалов и готовых изделий при бесконтактном тепловом воздействии от подвижного точечного СВЧ-источника тепла на исследуемые объекты. Отмечено, что отличительной особенностью предложенного метода является компенсация влияния тепловых потерь с поверхности исследуемого объекта в окружающую среду от лучистого и конвективного теплообмена на результаты измерения за счет адаптивного поиска точек контроля измеряемой температуры на поверхности исследуемых изделий, в которых неучтенные тепловые потери в окружающую среду равны между собой и компенсируются.

Введение

В настоящее время остро стоит вопрос о рациональном использовании топливно-энергетических ресурсов, в связи с чем активно ведется синтез различных теплоизолирующих материалов с использованием нанотехнологий (пенобетонов, газонаполненных пенопластов и т.д.), теплозащитные свойства которых существенно выше по сравнению с традиционными материалами. Кроме того, часто в строительной теплотехнике возникает задача определения теплозащитных свойств готовых многослойных конструкций, теплофизические свойства (ТФС) которых в процессе эксплуатации могут меняться из-за воздействия различных дестабилизирующих факторов. При этом важно сохранить целостность исследуемых строительных объектов. Поэтому задача контроля ТФС материалов и готовых изделий с сохранением их эксплуатационных характеристик является актуальной, и для ее решения необходимо создавать новые методы и информационно-измерительные системы (ИИС) неразрушающего контроля (НК) ТФС исследуемых объектов.

Анализ существующих методов контроля ТФС и разработка нового метода НК ТФС и реализующей его системы

Существующие методы контроля ТФС материалов и изделий имеют ряд недостатков, таких как необходимость изготовления образца материала заданных геометрических размеров и формы, что требует разрушения готовых изделий,

а также недостаточная точность и длительное время проведения теплофизических измерений [1 – 4].

Хорошо проработанная теория распространения электромагнитных волн СВЧ-диапазона [5 – 7], а также большое количество различной микроволновой техники, выпускаемой промышленностью, и возможность осуществления с ее помощью нагрева поверхностей исследуемых объектов делает методы бесконтактного неразрушающего контроля ТФС с использованием энергии СВЧ-излучения наиболее актуальными.

Существующие микроволновые методы контроля ТФС материалов и изделий [8 – 13] имеют некоторые недостатки, а именно, не компенсируют потери тепла с поверхности нагреваемых изделий в окружающую среду, что существенно снижает точность и достоверность определения коэффициентов тепло- и температуропроводности исследуемых объектов.

В работе предлагаются метод и реализующая его система, позволяющая существенно повысить точность искомых ТФС за счет компенсации неучтенных тепловых потерь в окружающую среду с поверхности исследуемых объектов.

Сущность предлагаемого метода НК ТФС материалов и изделий заключается в следующем.

На поверхность исследуемого объекта 1 воздействуют точечным микроволновым источником тепла 2 заданной мощностью q_1 , движущимся равномерно относительно объекта со скоростью V по линии A в направлении оси x (рис. 1). Источник СВЧ-излучения выполнен в виде рупорно-линзовой антенны, сфокусированной на поверхность исследуемого объекта в виде круга диаметром 0,001 мм. При этом частоту СВЧ-излучения определяют по соотношению

$$F = \frac{1}{z^2 \pi \mu_0 \mu \varepsilon}, \quad (1)$$

где μ_0, μ – магнитные диэлектрические проницаемости соответственно вакуума (абсолютная) и исследуемого материала; ε – удельная диэлектрическая проницаемость исследуемого материала.

Задают глубину проникновения электромагнитной волны в исследуемые материалы $z = 2 \dots 3$ мм, и по соотношению (1) определяют частоту СВЧ-излучения с использованием информации о магнитной и удельной диэлектрической проницаемости исследуемого материала. Затем постепенно смещают термодатчик 3 на линии A по оси x в сторону отставания от источника 2 до момента достижения измеряемой избыточной температуры поверхности исследуемого объекта заданного значения T_1 и измеряют расстояние x_1 .

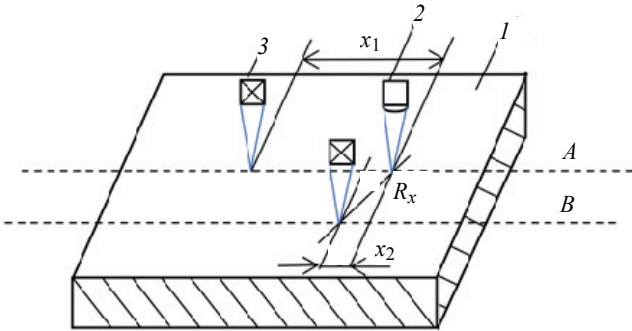


Рис. 1. Схема перемещения точечного СВЧ-источника тепла и термодатчика над поверхностью исследуемого объекта

Далее термоприемник 3 начинают перемещать по линии B в сторону источника энергии 2 до момента, когда измеряемое значение избыточной температуры станет равным T_1 , и измеряют расстояние R_x между источником энергии 2 и термоприемником 3.

Процесс распространения теплоты на поверхности исследуемого тела в точках, перемещающихся вслед за источником со скоростью источника по линии A , описывается выражением

$$T_1(x) = \frac{q_1}{2\pi\lambda x_1}, \quad (2)$$

где $T_1(x)$ – избыточная температура на поверхности тела; λ – коэффициент теплопроводности исследуемого объекта; q_1 – мощность источника СВЧ-излучения.

Избыточная температура на поверхности исследуемого объекта в точках на линии B описывается выражением

$$T_2(R, x) = \frac{q_1}{2\pi R_x \lambda} \exp\left[-\frac{V(R_x - x_2)}{2a}\right], \quad (3)$$

где R_x – расстояние между источником излучения и термоприемником; x_2 – расстояние между проекцией точки контроля температуры на расстоянии R_x ; a – коэффициент температуропроводности исследуемого материала.

Поскольку в предлагаемом методе избыточное значение заданной температуры T_1 равно T_2 , то приравняв выражения (2) и (3) и сделав ряд несложным математических операций, получим формулу для расчета коэффициента температуропроводности:

$$a = \frac{V(x_2 - R_x)}{2 \ln \frac{R_x}{x_1}}. \quad (4)$$

Так как температуры на поверхности исследуемого объекта в контролируемых точках на расстоянии x_1 на линии A и R_x на линии B равны, то и потери от лучистого и конвективного теплообмена в окружающую среду, определяемые по соотношениям (5) и (6), тоже равны, поэтому на результаты измерения температуропроводности a эти потери не влияют:

$$\Delta q_k = a_k(T_{\text{п}} - T_{\text{с}})S, \quad (5)$$

где Δq_k – конвективные потери; a_k – коэффициент конвективного теплообмена, Вт/(м²·К); $T_{\text{п}}$, $T_{\text{с}}$ – температуры поверхности нагретого тела и окружающей среды соответственно, К; S – площадь теплоотдающей поверхности, м²;

$$\Delta q_{\text{л}} = a_{\text{л}}(T_{\text{п}} - T_{\text{с}})S = C_0 \left[\left(\frac{T_{\text{п}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{с}}}{100} \right)^4 \right] S, \quad (6)$$

$\Delta q_{\text{л}}$ – лучистые потери; $a_{\text{л}}$ – коэффициент лучистого теплообмена, Вт/(м²·К); $C_0 = 5,67$ – постоянная Стефана–Больцмана, Вт/(м²·К⁴).

Для определения теплопроводности исследуемого материала увеличивают мощность источника q_1 на 10 % и измеряют избыточную температуру поверхности исследуемого объекта на расстоянии R_x на линии B . При этом измеренная избыточная температура T_3 определяется выражением

$$T_3(R, x) = \frac{q_2}{2\pi R_x \lambda} \exp \left[-\frac{V(R_x - x_2)}{2a} \right], \quad (7)$$

где q_2 – увеличенная мощность источника СВЧ-излучения.

После несложных математических преобразований выражений (3) и (7) найдем формулу, по которой определяется искомая теплопроводность:

$$\lambda = \frac{q_2 - q_1}{2\pi R_x \Delta T} \exp \left[-\frac{V(x_2 - R_x)}{2a} \right], \quad (8)$$

где ΔT – разница температур T_3 и T_2 .

В процессе нагревания поверхности полуограниченного исследуемого материала неизбежно возникают потери в окружающую среду $\Delta q_{\text{пот}}$, которые состоят из лучистого и конвективного теплообмена и определяются по соотношению

$$\Delta q_{\text{пот}} = \Delta q_{\text{к}} + \Delta q_{\text{л}}. \quad (9)$$

Мощность источника тепла с учетом потерь описывается формулами:

$$q_1 = q_{\text{ист1}} - \Delta q_{\text{пот1}}, \quad (10)$$

$$q_2 = q_{\text{ист2}} - \Delta q_{\text{пот2}}, \quad (11)$$

где $q_{\text{ист1}}$ и $q_{\text{ист2}}$ – истинные значения соответственно начальной мощности точечного источника теплового излучения и увеличенной.

Потери тепловой энергии в окружающую среду при прохождении точки контроля температуры расстояния от области нагрева до точки с координатой R_x при мощности источника q_1 определяются выражением

$$\Delta q_{\text{пот1}} = \int_0^{R_x} (T_2(R_x, x) - T_c) dR = S_1(R_x). \quad (12)$$

Потери тепла при увеличении мощности до q_2

$$\Delta q_{\text{пот2}} = \int_0^{R_x} (T_3(R_x, x) - T_c) dR = S_2(R_x). \quad (13)$$

Так как площади, определяемые соотношениями (12) и (13), почти равны (рис. 2), то и потери $\Delta q_{\text{пот2}} \approx \Delta q_{\text{пот1}}$ практически равны, ΔS – разница между S_2 и S_1 .

Для определения тепловых потерь от лучистого и конвективного теплообмена необходимо рассчитать площадь теплоотдающей поверхности (см. формулы (5) и (6)), чтобы рассчитать потери с поверхности исследуемого изделия.

На рисунке 3 представлены площади эллипсов теплоотдающей поверхности $S_1 - S_5$ со средней температурой для каждого из них, полученные с использованием соотношения (3). Разбиение теплоотдающей поверхности исследуемого тела осуществлялось таким образом, что средняя температура в каждом эллипсе отличается не более чем 10 °C, что вполне обеспечивает необходимую точность расчетов.

Результаты потерь тепла для мощности СВЧ-источника q_1 и q_2 приведены в табл. 1.

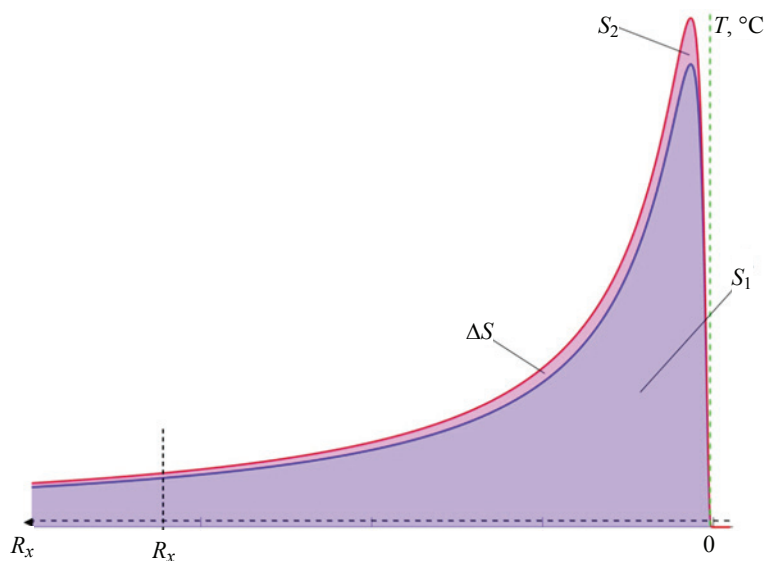


Рис. 2. Интегральное значение температур на поверхности исследуемого объекта при мощности источника q_1 и q_2

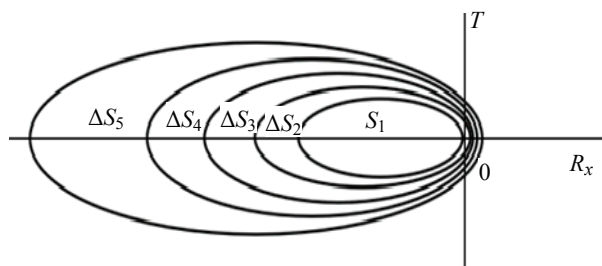


Рис. 3. Изотермы температурного поля на поверхности исследуемого объекта от движущегося с постоянной скоростью точечного источника тепла СВЧ-излучения (S_1 – площадь первого наиболее нагретого эллипса поверхности тела; ΔS_2 – разница между S_1 и S_2 равной $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, далее $\Delta S_i = \Delta S_{i+1} - \Delta S_i$, где i – номер эллипса)

Таблица 1

Результаты тепловых потерь с поверхности исследуемого объекта в окружающую среду

Номер эллипса теплоотдающей поверхности	$S_1, \Delta S_i, \text{ м}^2$	$\Delta q_{\text{пот1}}, \text{ Вт}$	$\Delta q_{\text{пот1}}, \%$	$\Delta q_{\text{пот2}}, \text{ Вт}$	$\Delta q_{\text{пот2}}, \%$
1	0,0045	4,5	9	5,2	9,5
2	0,0018	1,44	2,8	1,6	3,2
3	0,0034	2,04	4,1	2,4	4,4
4	0,0081	3,24	6,5	3,76	6,8
5	0,0328	6,56	13,1	7,6	13,8
$\Sigma S_1 + \Delta S_i, \Sigma \Delta q_{1,2}$	0,0506	17,78	35,6	20,56	37,4

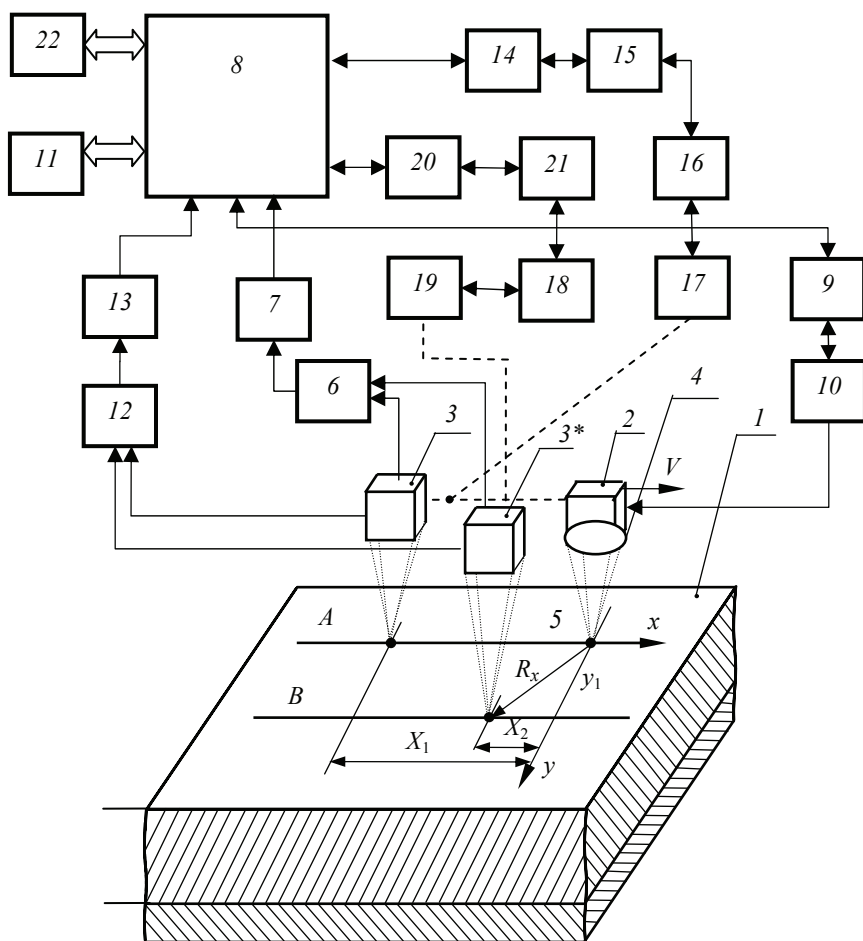


Рис. 4. Блок-схема микропроцессорной ИИС, реализующая предложенный метод

Результаты расчета показали, что при мощности q_1 суммарные потери $\Delta q_{\text{пот1}}$ составляют 35,6 %. При увеличении мощности на 10 % суммарные потери $\Delta q_{\text{пот2}}$ увеличатся до 37,4 %. Отсюда около 98 % потерь при нахождении теплопроводности исследуемого объекта скомпенсируются.

Для реализации предложенного метода неразрушающего контроля ТФС материалов разработана микропроцессорная система, блок-схема которой представлена на рис. 4. Над исследуемым материалом 1 на линии движения А помещают точечный источник тепловой СВЧ-энергии 2 и бесконтактный термодатчик 3, сфокусированные на поверхность, подверженную тепловому воздействию. При этом с помощью линзы из радиопрозрачного материала 4 (фторопласт) излучение фокусируют в точку теплового воздействия 5. Информацию о значении температуры в точках контроля снимают термодатчиком 3, сфокусированным в точки на линии А и В поверхности исследуемого объекта. Значения температур с термодатчика 3 поступают на нормирующий прецизионный усилитель 6 и через АЦП 7 поступают на микропроцессор 8, соединенный с СВЧ-генератором 2 через блок управления 9 и блок питания СВЧ-источника 10.

К микропроцессору 8 через его порт (адаптер ввода-вывода) 11 вводятся исходные данные (T , V , q). Датчик положения 12 термодатчика 3 определяет расстояние между точечным источником тепла 2 и термодатчиком 3, и через

АЦП 13 передает данные в микропроцессор 8. Блок управления реверсивным двигателем 14 координируется микропроцессором 8 и подключен к блоку питания 15, который подключен к реверсивному двигателю 16, выход которого в свою очередь соединен с механизмом перемещения 17 термодатчика 3 относительно теплового источника 2 по оси x . Перемещение всего информационного зонда ИИС, состоящего из точечного источника тепла 2 и термодатчика 3, над поверхностью исследуемых материалов с заданной скоростью V осуществляется двигателем постоянного тока 18 через механизм перемещения 19, который кинематически связан с измерительным зондом. Управление работой двигателя 18 осуществляется микропроцессором 8 через блок управления двигателем 20 и блок питания двигателя постоянного тока 21. Микропроцессор 8 выводит экспериментальные данные на индикатор (монитор) 22.

Информационно-измерительная система реализует разработанный бесконтактный метод НК ТФС искомых материалов следующим образом. Включают источник тепла 2 и начинают его перемещение вместе с термодатчиком 3 над исследуемым образцом 1 с постоянной скоростью V . Термодатчик 3, движущийся при этом на линии перемещения пятна нагрева источника теплоты с некоторым отставанием от него, фиксирует избыточную температуру нагреваемой поверхности, соответствующую установившемуся квазистационарному режиму нагрева. Затем постепенно изменяют расстояние отставания точки контроля избыточной установившейся температуры от точки подвода теплоты, величина которой устанавливается таким образом, чтобы с помощью используемой контрольно-измерительной аппаратуры ее можно было бы измерить с заданной погрешностью. Разностный сигнал ΔT , который фиксируется в микроконтроллере 8, дает сигнал через блок управления 20 и блок питания 21 на реверсивный двигатель 18, который в зависимости от знака и величины рассогласования перемещает в ту или иную сторону (в сторону уменьшения или увеличения расстояния между термодатчиком и источником) термодатчик 3 относительно источника тепла 2.

Изменение расстояния (перемещение термодатчика) между точкой измерения температуры и точкой подвода теплоты осуществляют до тех пор, пока измеряемая избыточная температура поверхности исследуемого образца станет равной заданному значению $T_{\text{зад}}$. При этом датчик положения 12 фиксирует установившееся расстояние между точкой подвода теплоты 5 и бесконтактным термодатчиком 3, и через АЦП 13 значение заносится в оперативную память микропроцессора 8. Затем перемещают термодатчик 3 на линию движения B , параллельную линии движения источника и смещенную от нее на расстояние y_1 , и повторяют вышеописанные измерительные процедуры.

При этом информация об установившемся расстоянии R_x между точкой измерения температуры и точкой подвода теплоты фиксируется датчиком положения 12 и через АЦП 13 заносится в оперативную память микропроцессора 8. Затем по заложенной в микропроцессоре программе на основе полученной измерительной информации осуществляется расчет теплофизических характеристик по алгоритму, построенному в соответствии с формулами (4) и (8).

Для проверки работоспособности предложенного метода проведены эксперименты на полуограниченном в тепловом отношении образцах из силикатного кирпича, красного кирпича и керамзитобетона. Нагрев образцов осуществлялся при температуре окружающей среды $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$. Скорость движения зонда составляет $V = 0,005$ м/с. Частота СВЧ-излучения, определяемая по соотношению (1) для каждого из материалов, составляет 4, 3,8 и 4,5 ГГц соответственно. Мощность излучения 300 и 330 Вт. Измерение температуры осуществлялось инфракрасным термометром Optris CSlaser LT, позволяющим проводить измерения

Таблица 2

Определение ТФС теплоизоляционных строительных материалов

Номер эксперимента	V , м/с	q , Вт	x , м	Данные, полученные на основе предлагаемого метода		Данные, полученные известными методами		Уменьшение погрешностей в предложенном методе	
				$a \cdot 10^{-6}$, м ² /с	λ , Вт/(м·К)	$a \cdot 10^{-6}$, м ² /с	λ , Вт/(м·К)	Δa , %	$\Delta \lambda$, %
Силикатный кирпич									
1	0,005	500	0,018	0,553	0,748	0,569	0,729	4,89	3,74
2	0,004		0,012	0,548	0,746	0,542	0,709	4,79	4,46
3	0,003		0,009	0,544	0,733	0,575	0,714	3,50	3,66
4	0,005	1000	0,016	0,564	0,716	0,587	0,731	5,07	4,41
5	0,006		0,020	0,562	0,710	0,533	0,692	3,72	4,13
Красный кирпич									
1	0,005	500	0,016	0,367	0,665	0,356	0,628	4,38	4,22
2	0,004		0,012	0,379	0,663	0,372	0,661	3,93	3,91
3	0,003		0,008	0,365	0,669	0,372	0,647	3,83	3,82
4	0,005	1000	0,014	0,337	0,651	0,364	0,644	4,38	4,13
5	0,006		0,018	0,335	0,652	0,355	0,641	3,93	5,06
Керамзитобетон									
1	0,005	500	0,016	0,296	0,573	0,301	0,598	5,42	5,28
2	0,004		0,012	0,292	0,570	0,299	0,595	5,65	4,66
3	0,003		0,008	0,294	0,574	0,265	0,599	3,89	4,73
4	0,005	1000	0,014	0,276	0,544	0,267	0,526	3,71	4,43
5	0,006		0,018	0,271	0,582	0,270	0,529	4,42	4,51

температуры в диапазоне от –30 до +1000 °С при температуре окружающей среды от –20 до +85 °С с погрешностью 0,5 %. Полученные в ходе экспериментов данные представлены в табл. 2. Для оценки погрешности метода приведены данные известных методов по исследуемым материалам.

Заключение

Результаты теплофизического эксперимента показывают работоспособность предложенного метода, новизна которого заключается в следующем:

- 1) высокая мобильность предложенного метода измерения ТФС исследуемого материала позволяет измерить большую площадь исследуемых объектов, что повышает производительность измерений ТФС;
- 2) теоретические и экспериментальные исследования показали, что предложенный метод позволяет скомпенсировать до 90 % неучтенных тепловых потерь с поверхности исследуемых объектов в окружающую среду, что, несомненно, повысит метрологический уровень метода, по сравнению с известными методами неразрушающего контроля ТФС материалов и изделий;
- 3) проведенная экспериментальная проверка показала, что предложенное техническое решение по сравнению с известными методами позволило на 3 – 6 % повысить точность результатов измерения.

Список литературы

1. Патент № 2530441 Российская Федерация, МПК G 01 N 25/18. Способ неразрушающего контроля комплекса теплофизических характеристик твердых строительных материалов и установка для его осуществления : № 2013131702/28 : заявл. 09.07.2013 : опубл. 10.10.2014, бюл. № 28 / Фокин В. М., Ковылин А. В., Попова А. В.; патентообладатель Фокин В. М.
2. Патент № 2488102 Российская Федерация, МПК G 01 N 25/18. Способ определения теплопроводности твердого тела активным методом теплового неразрушающего контроля : № 2012106323/28 : заявл. 21.02.2012 : опубл. 20.07.2013, бюл. № 20 / Карпов Д. Ф., Павлов М. В., Сеницын А. А., Игонин В. И. ; патентообладатель ВоГТУ.
3. Патент № 2379668 Российская Федерация, МПК G 01 N 25/18. Способ неразрушающего контроля теплофизических характеристик строительных материалов и изделий : № 2008140634/28 : заявл. 13.10.2008 : опубл. 20.01.2010, бюл. № 2 / Игонин В. И., Карпов Д. Ф. ; патентообладатель ВоГТУ.
4. Патент № 2328725 Российская Федерация, МПК G 01 N 25/18. Способ неразрушающего контроля теплофизических характеристик строительных материалов и изделий : № 2006140757/28 : заявл. 17.11.2006 : опубл. 10.07.2008, бюл. № 19. / Жуков Н. П., Майникова Н. Ф., Рогов И. В., Чех А. С., Никулин С. С. ; патентообладатель ГОУ ВПО «ТГТУ».
5. Пюшнер, Г. Нагрев энергией сверхвысоких частот / Г. Пюшнер ; пер. с англ. Э. Я. Пастрона. – Москва : Энергия, 1968. – 312 с.
6. Лыков, А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков. – Москва : Высшая школа, 1967. – 599 с.
7. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий : справочник: в 2 кн. Кн. 2 / И. С. Вайншток, В. Г. Герасимов, А. К. Гурвич [и др.] ; под ред. В. В. Клюева. – Москва : Машиностроение, 1976. – 326 с.
8. Чернышов, В. Н. Методы и информационно-измерительные системы неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов и изделий / В. Н. Чернышов, Т. И. Чернышова. – Санкт-Петербург : Экспертные решения, 2016. – 384 с.
9. Чернышов, А. В. Анализ погрешностей бесконтактного метода неразрушающего контроля ТФХ материалов / А. В. Чернышов // Тр. ТГТУ : сб. науч. ст. молодых ученых и студентов. – Тамбов, 2004. – Вып. 16. – С. 63 – 67.
10. Удалова, А. П. Метод неразрушающего контроля теплофизических характеристик материалов и изделий с использованием СВЧ-нагрева в реальных условиях эксплуатации изделий / А. П. Удалова, В. Н. Чернышов // Контроль. Диагностика. – 2021. – Т. 24, № 11. – С. 58 – 63. doi 10.14489/td.2021.11.pp.058-063
11. Удалова, А. П. Метод неразрушающего контроля теплофизических характеристик материалов и изделий с использованием СВЧ-нагрева и его метрологический анализ / А. П. Удалова, В. Н. Чернышов // Теплофизика и информационные технологии : материалы Двенадцатой Международной теплофизической школы, Тамбов, 19–20 октября, 2021 г. – Тамбов, 2021. – С. 246 – 249.
12. Удалова, А. П. Неразрушающий микроволновый метод контроля теплофизических характеристик многослойных конструкций с метрологическим анализом / А. П. Удалова, А. В. Чернышов // Теплофизика и информационные технологии : материалы Двенадцатой Международной теплофизической школы, Тамбов, 19–20 октября, 2021 г. – Тамбов, 2021. – С. 250 – 254.

13. Мордасов, С. А. Контроль теплофизических характеристик строительных материалов адаптивным методом с использованием СВЧ-нагрева / С. А. Мордасов, А. П. Негуляева, В. Н. Чернышов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2020. – Т. 86, № 2. – С. 30 – 36. doi: 10.26896/1028-6861-2020-86-2-30-36

The Microwave Method and its System of Non-Destructive Testing of Heat-Protective Properties of Building Materials and Products

D. Yu. Ostroukhov¹✉, T. I. Chernyshova², V. N. Chernyshov¹

*Department of Criminal Law and Applied Computer Science in Jurisprudence (1),
Denistambov359@gmail.com; Department of Design of Radioelectronic
and Microprocessor Systems (2), TSTU, Tambov, Russia*

Keywords: adaptive information-measuring system; error source analysis; mobile microwave heat source; thermal conductivity and diffusivity; heat losses from radiant and convective heat exchange.

Abstract: A method and a measuring and control system for determining the thermophysical characteristics (heat and thermal conductivity) of materials and finished products under non-contact thermal action from a movable point microwave heat source on the objects under study are proposed. A distinctive feature of the proposed method is to compensate for the effect of heat losses from the surface of the object under study into the environment from radiant and convective heat exchange on the measurement results by adaptively searching for control points for the measured temperature on the surface of the products under study, in which the unaccounted-for heat losses to the environment are equal to each other and compensated.

References

1. Fokin V.M., Kovylin A.V., Popova A.V. *Sposob nerazrushayushchego kontrolya kompleksa teplofizicheskikh kharakteristik tverdykh stroitel'nykh materialov i ustanovka dlya yego osushchestvleniya* [A method of non-destructive testing of a complex of thermophysical characteristics of solid building materials and an installation for its implementation], Russian Federation, 2014, Pat. 2530441 (In Russ.).
2. Karpov D.F., Pavlov M.V., Sinitsyn A.A., Igonin V.I. *Sposob opredeleniya teploprovodnosti tverdogo tela aktivnym metodom teplovogo nerazrushayushchego kontrolya* [Method for determining the thermal conductivity of a solid by the active method of thermal non-destructive testing], Russian Federation, 2013, Pat. 2488102 (In Russ.).
3. Igonin V.I., Karpov D.F. *Sposob nerazrushayushchego kontrolya teplofizicheskikh kharakteristik stroitel'nykh materialov i izdeliy* [Method of non-destructive testing of thermophysical characteristics of building materials and products], Russian Federation, 2010, Pat. 2379668 (In Russ.).
4. Zhukov N.P., Mainikova N.F., Rogov I.V., Chekh A.S., Nikulin S.S. *Sposob nerazrushayushchego kontrolya teplofizicheskikh kharakteristik stroitel'nykh materialov i izdeliy* [Method of non-destructive testing of thermophysical characteristics of building materials and products], Russian Federation, 2008, Pat. 2328725 (In Russ.).

5. Pyushner G. *Nagrev energiyey sverkhvysokikh chastot* [Heating by the energy of ultrahigh frequencies], Moscow: Energiya, 1968, 312 p. (In Russ.)
6. Lykov A.V. *Teoriya teploprovodnosti* [Theory of thermal conductivity], Moscow: Vysshaya shkola, 1967, 599 p. (In Russ.)
7. Vainshtok I.S., Gerasimov V.G., Gurvich A.K. [et al.]; Klyuev V.V. (Ed.). *Pribory dlya nerazrushayushchego kontrolya materialov i izdeliy: spravochnik* [Devices for non-destructive testing of materials and products]: in 2 books; Book 2, Moscow: Mashinostroenie, 1976, 326 p. (In Russ.)
8. Chernyshov V.N., Chernyshova T.I. *Metody i informatsionno-izmeritel'nyye sistemy nerazrushayushchego kontrolya teplofizicheskikh svoystv materialov i izdeliy* [Methods and information and measuring systems for non-destructive testing of thermophysical properties of materials and products], St. Petersburg: Ekspertnyye resheniya, 2016, 384 p. (In Russ.)
9. Chernyshov A.V. *Trudy TGTU: sbornik nauchnykh statei molodykh uchenykh i studentov* [Proceedings of TGTU: collection of scientific articles by young scientists and students], Tambov, 2004. Issue 16, pp. 63-67. (In Russ.)
10. Udalova A.P., Chernyshov V.N. [Method of non-destructive testing of thermophysical characteristics of materials and products using microwave heating under real operating conditions of products], *Kontrol'. Diagnostika* [Control. Diagnostics], 2021, vol. 24, no. 11, pp. 58-63. doi: 10.14489/td.2021.11.pp.058-063 (In Russ., abstract in Eng.)
11. Udalova A.P., Chernyshov V.N. *Teplofizika i informatsionnyye tekhnologii: materialy Dvenadtsatoy Mezhdunarodnoy teplofizicheskoy shkoly* [Thermophysics and Information Technologies: Proceedings of the Twelfth International School of Thermophysics], Tambov, 19-20 October, 2021, Tambov, 2021, pp. 246-249. (In Russ.)
12. Udalova A.P., Chernyshov A.V. *Teplofizika i informatsionnyye tekhnologii: materialy Dvenadtsatoy Mezhdunarodnoy teplofizicheskoy shkoly* [Thermophysics and Information Technologies : proceedings of the Twelfth International School of Thermophysics], Tambov, 19-20 October, 2021, Tambov, 2021, pp. 250-254. (In Russ.)
13. Mordasov S.A., Negulyaeva A.P., Chernyshov V.N. [Control of thermophysical characteristics of building materials by an adaptive method using microwave heating], *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov* [Factory Laboratory. Diagnostics of materials], 2020, vol. 86, no. 2, pp. 30-36. doi: 10.26896/1028-6861-2020-86-2-30-36 (In Russ., abstract in Eng.)

Mikrowellenverfahren und das zugehörige System zur zerstörungsfreien Prüfung der Wärmeschutzeigenschaften von Baumaterialien und Bauprodukten

Zusammenfassung: Es sind ein Verfahren und ein zugehöriges Mess- und Regelsystem zur Bestimmung der thermophysikalischen Eigenschaften (Temperatur und Temperaturleitfähigkeit) von Werkstoffen und Fertigprodukten unter berührungsloser thermischer Einwirkung einer beweglichen Mikrowellen-Punktwärmequelle auf die Prüfobjekte vorgestellt. Das Verfahren zeichnet sich durch die Kompensation des Einflusses von Wärmeverlusten der Prüfobjektoberfläche in die Umgebung aufgrund von Strahlungs- und Konvektionswärmeaustausch auf die Messergebnisse aus. Dies geschieht durch eine adaptive Suche nach Kontrollpunkten der gemessenen Temperatur auf der Prüfobjektoberfläche, an denen die nicht berücksichtigten Wärmeverluste in die Umgebung gleich groß sind und kompensiert werden.

Méthode à micro-ondes et système de contrôle non destructif des propriétés de protection thermique des matériaux et des produits de construction

Résumé: Sont proposés la méthode et le système de mesure et de contrôle de la détermination des caractéristiques thermiques (chaleur- et conductivité thermique) des matériaux et des produits finis sous l'effet thermique sans contact d'une source de chaleur micro-ondes ponctuelle mobile sur les objets en question. Il est à noter que la caractéristique distinctive de la méthode proposée est la compensation de l'influence des pertes thermiques de la surface de l'objet étudié dans l'environnement de l'échange de chaleur radiante et convective sur les résultats de mesure en recherchant de manière adaptative les points de contrôle de la température mesurée à la surface des produits étudiés, dans lesquels les pertes thermiques non comptabilisées dans l'environnement sont égales entre elles et compensées.

Авторы: *Остроухов Денис Юрьевич* – аспирант кафедры «Уголовное право и прикладная информатика в юриспруденции»; *Чернышова Татьяна Ивановна* – доктор технических наук, профессор кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем»; *Чернышов Владимир Николаевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Уголовное право и и прикладная информатика в юриспруденции», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.