

DOI: 10.26896/1028-6861-2018-84-10-29-34

МИКРОВОЛНОВЫЙ МЕТОД НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

© Владимир Николаевич Чернышов, Мария Валерьевна Жарикова, Алексей Владимирович Чернышов

Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов, Россия; e-mail: elters@crimeinfo.jesby.tstu.ru

Статья поступила 30 января 2018 г.

Рассмотрены бесконтактный микроволновый метод и реализующая его информационно-измерительная система (ИИС) для определения теплофизических характеристик (ТФХ) строительных материалов и изделий. Метод предусматривал сверхвысокочастотный (СВЧ) нагрев исследуемых образцов посредством воздействия на поверхность строительного объекта электромагнитного поля микроволнового диапазона через круговую область, контроль температуры в центре круга и окружающей среды. Для практической реализации метода разработали микропроцессорную ИИС, позволяющую определять ТФХ исследуемых объектов с высокой точностью. Отличительная ее особенность — оперативное автоматическое управление всеми операциями теплофизического эксперимента, а также контроль тепловых потерь в окружающую среду с поверхности круговой области микроволнового воздействия и внесение поправок на эти потери в целях повышения точности конечных результатов. Анализ полученных расчетных и экспериментальных данных показал, что исключение влияния контактного термосопротивления, возникающего между поверхностями образца и нагревательного элемента, на определение искомых ТФХ повышает точность метода в среднем на 6–8 %. Это делает его предпочтительным по сравнению с другими известными методиками и позволяет использовать в практике теплофизических измерений и строительной теплотехнике.

Ключевые слова: теплопроводность; температуропроводность; тепловая активность; микроволновый нагрев; микропроцессорная система; строительная теплотехника.

MICROWAVE METHOD OF NONDESTRUCTIVE CONTROL OF THERMAL CHARACTERISTICS OF BUILDING MATERIAL

© Vladimir N. Chernyshov, Maria V. Zharikova, Alexey V. Chernyshov

Tambov state technical university, Tambov, Russia; e-mail: elters@crimeinfo.jesby.tstu.ru

Submitted January 30, 2018.

A contactless microwave method and corresponding information-measuring system (IMS) for determination of thermal and physical characteristics thermal and physical characteristics (TPH) of building materials and products are considered. The method provides microwave heating of the samples by exposing the surface of the sample to electromagnetic field of the microwave range through a circular area, as well as temperature control of the environment and in the center of the circle. A microprocessor-based IMS system developed for practical implementation of the proposed method provides determination of the thermal and physical characteristics of the objects under study with high accuracy. A possibility of on-line automatic control of all operations of the thermophysical experiment, as well as the control of heat losses to the environment from the surface of the circular spot subjected to microwave heating and the timely correction of those losses to improve the accuracy of the final results is a distinctive feature of the system. Analysis of the calculated and experimental data showed that the elimination of the impact of the contact thermal resistance arising between the surfaces of the sample and the heating element on the determination of the desired thermal characteristics increases the accuracy of the method by 6–8 %. The developed method allows more accurate determination of the thermal characteristics compared to other known techniques and can be used in practice of general thermal measurements and thermal engineering for construction.

Keywords: thermal conductivity; thermal diffusivity; thermal activity; microwave heating; microprocessor system; thermal engineering for construction.

При возведении строительных объектов и их эксплуатации часто сталкиваются с задачей рационального использования топливно-энергетических ресурсов. Ее решение тесно связано с применением вновь синтезируемых строительных материалов, которые по своим технологическим и эксплуатационным параметрам имеют преимущества перед естественными материалами (обладают более высоким коэффициентом сопротивления теплопередаче и, соответственно, низкими коэффициентами тепло- и температуропроводности). Теплофизические характеристики (ТФХ) таких материалов определяют теплозащитные свойства строительных сооружений и влияют на их тепловой и воздушный режимы, работу систем отопления, вентиляции, кондиционирования воздуха и др.

В настоящее время появляются и находят широкое применение методы контроля ТФХ строительных изделий, основанные на использовании сверхвысокочастотного (СВЧ) нагрева исследуемого объекта [1–3]. Их отличает оперативность, более высокая точность получаемых результатов, возможность прогрева большого объема анализируемого материала, получение интегральных и усредненных по объему значений ТФХ, что необходимо для большей достоверности данных о теплозащитных свойствах строительного материала, как правило, дисперсного, неоднородного, анизотропного и т.д.

Цель работы — разработка бесконтактного микроволнового метода неразрушающего контроля ТФХ строительных материалов и изделий [4].

На поверхность исследуемого строительного материала (красный кирпич) воздействовали электромагнитным полем микроволнового диапазона (частота не менее 10 ГГц). В заданный момент времени измеряли температуру в центре круга микроволнового нагрева (остальная поверхность теплоизолирована от окружающей

среды) диаметром 0,05–0,1 м бесконтактным датчиком инфракрасного диапазона TW2000, температуру окружающей среды — цифровым термометром МР707. Зная эти температуры, мощность СВЧ-излучения, а также диэлектрическую проницаемость материала, искомые ТФХ определяли по математическим соотношениям, полученным на основании модельных представлений физических процессов, происходящих при воздействии на поверхность исследуемых объектов высокочастотного электромагнитного поля в виде круга заданного радиуса R_n .

Строительные материалы (кирпич, бетон, пенобетон и др.) — диэлектрики. Соответственно, под действием высокочастотного электромагнитного излучения СВЧ-диапазона они нагреваются. Удельная мощность рассеяния (P) в исследуемом объекте определяется как [5]

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

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

Как известно, электромагнитная волна в диэлектрике ослабляется в направлении распространения в соответствии с зависимостью [5]

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

где z — глубина проникновения;

$$\alpha^* = \frac{\pi \epsilon_M''}{\lambda_{\Gamma} \sqrt{\epsilon_M'}} \quad (3)$$

коэффициент затухания (λ_{Γ} — длина волны; ϵ_M' , ϵ_M'' — действительная и мнимая составляющие диэлектрической проницаемости исследуемого материала).

Из (1) и (2) видно, что глубина проникновения электромагнитного поля СВЧ-диапазона в наибольшей степени зависит от частоты СВЧ-излучения. На рис. 1 показана зависимость глубины проникновения электромагнитных волн от частоты излучения, а следовательно, и глубины тепловыделяющей области от частоты излучения СВЧ-генератора при воздействии на традиционные строительные материалы (в данном случае — на красный кирпич).

Полученные результаты показали, что при воздействии на исследуемый материал электромагнитным излучением СВЧ-диапазона в виде круга частотой не менее 10 ГГц практически вся тепловая мощность выделяется в поверхностном слое глубиной 0,002–0,003 м.

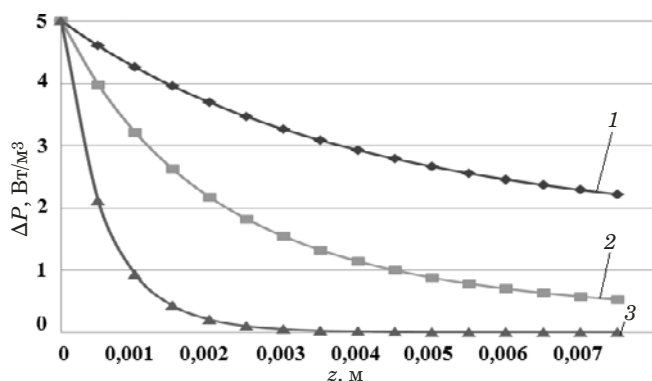


Рис. 1. Зависимость глубины проникновения электромагнитных волн частотой 3 (1), 5 (2) и 10 ГГц (3) от мощности потерь

Отметим, что для достоверного определения ТФХ исследуемые образцы необходимо прогревать на глубину не менее 0,05 – 0,1 м. На рис. 2 представлена схема нагрева полуограниченного в тепловом отношении тела при воздействии на его поверхность СВЧ-излучения через круг радиусом R_n (поверхность вне круговой области теплоизолирована).

Для определения распределения температуры в любой точке полуограниченного тела ($z \geq 0$) в любой момент времени ($\tau > 0$) необходимо решить следующую систему дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 T_1(x, z, \tau)}{\partial x^2} + \frac{1}{x} \frac{\partial T_1(x, z, \tau)}{\partial x} + \\ + \frac{\partial^2 T_1(x, z, \tau)}{\partial z^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial T_1(x, z, \tau)}{\partial \tau}, \end{aligned} \quad (4)$$

(для области $0 \leq x \leq R_n$, $z \leq 0$; $\tau > 0$),

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 T_2(x, z, \tau)}{\partial x^2} + \frac{1}{x} \frac{\partial T_2(x, z, \tau)}{\partial x} + \\ + \frac{\partial^2 T_2(x, z, \tau)}{\partial z^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial T_2(x, z, \tau)}{\partial \tau}, \end{aligned} \quad (5)$$

(для области $\infty > x > R_n$; $z \leq 0$, $\tau > 0$), где $T_1(x, z, \tau)$ и $T_2(x, z, \tau)$ — распределения температур в областях $0 \leq x \leq R_n$ и $\infty > x > R_n$ (см. рис. 2).

Начальные и граничные условия для системы (4) – (5) следующие:

$$T_1(x, z, 0) = T_2(x, z, 0) = T_0 = \text{const}, \quad (6)$$

$$-\lambda \frac{\partial T_1(x, 0, \tau)}{\partial z} = q(\tau), \quad 0 \leq x \leq R_n, \quad (7)$$

$$\frac{\partial T_2(x, 0, \tau)}{\partial z} = 0, \quad (x > R_n), \quad (8)$$

$$\frac{\partial T_1(x, z, \tau)}{\partial z} = 0, \quad (9)$$

$$T_1(x, \infty, \tau) = T_2(x, \infty, \tau) = T_0, \quad (10)$$

$$T_1(R_n, z, \tau) = T_2(R_n, z, \tau), \quad (11)$$

$$\frac{\partial T_1(R_n, z, \tau)}{\partial x} = \frac{\partial T_2(R_n, z, \tau)}{\partial x}, \quad (12)$$

где $T(x, z, \tau)$ — температура исследуемого тела в точке с координатами (x, z, τ) ; T_0 , λ , a — начальная температура, тепло- и температуропроводность исследуемого объекта.

Применяя интегральные преобразования Фурье и Лапласа [6] и используя начальные и граничные условия (6) – (12), получаем решение

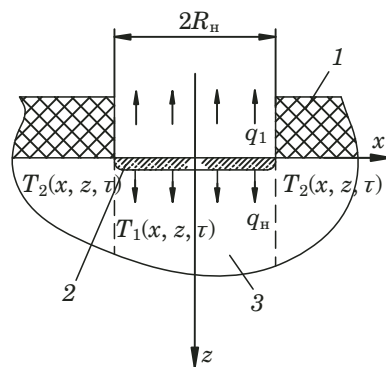


Рис. 2. Схема нагрева полуограниченного в тепловом отношении тела при воздействии СВЧ-излучения через круговую область на поверхности: 1 — теплоизолятор; 2 — область тепловыделения; 3 — исследуемый объект

для температурного поля на поверхности исследуемого тела ($x = 0$):

$$\begin{aligned} T_1(0, z, \tau) - T_0 = \Delta T(0, z, \tau) = \\ = \frac{2q_n \sqrt{\tau}}{b} \left[\text{ierfc} \left(\frac{z}{2\sqrt{a\tau}} \right) - \text{ierfc} \left(\frac{\sqrt{R_n^2 + z^2}}{2\sqrt{a\tau}} \right) \right], \end{aligned} \quad (13)$$

где $b = \frac{\lambda}{\sqrt{a}}$ — коэффициент тепловой активности тела; $\text{ierfc}(z)$ — интеграл вероятности (функция ошибок Гаусса); $q_n = P_n/S$ — удельный тепловой поток через круг радиуса R_n ; P_n — мощность СВЧ-генератора; S — площадь круга.

Из уравнения (13) при $z = 0$ находим выражение для определения температурного поля в следующем виде:

$$T_1(0, 0, \tau) = \frac{2q_n \sqrt{\tau}}{b} \left[\frac{1}{\sqrt{\pi}} - \text{ierfc} \left(\frac{R_n}{2\sqrt{a\tau}} \right) \right], \quad (14)$$

так как $\text{ierfc}(0) = \frac{1}{\sqrt{\pi}}$.

После преобразований и при условии малых значений времени τ получаем формулу для тепловой активности исследуемого образца:

$$b = \frac{2q_n^* \sqrt{\tau^*}}{T(0, 0, \tau) \sqrt{\pi}}, \quad (15)$$

где τ^* — заданный момент времени;

$$q_n^* = q_n - q_1 \quad (16)$$

($q_1 = \chi_\tau S \Delta T$ — величина теплового потока с поверхности круга в окружающую среду [8]; χ_τ — коэффициент теплоотдачи исследуемого материала [10]; ΔT — разность между температурой окружающей среды и температурой в центре круга).

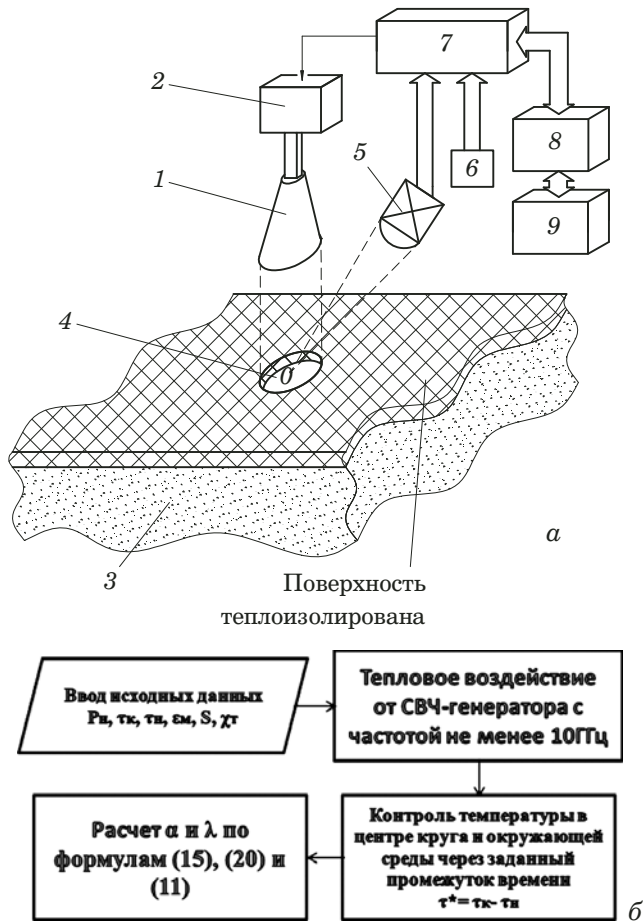


Рис. 3. Блок-схема ИМС, реализующей бесконтактный микроволновый метод неразрушающего контроля ТФХ материалов (а), и алгоритм ее работы (б)

Из соотношения (14) получаем выражение для определения функции вероятности:

$$\operatorname{ierfc}\left(\frac{R_n}{2\sqrt{a\tau^*}}\right) = \frac{1}{\pi} - \frac{T(0,0,\tau)b}{2q_n^*\sqrt{a\tau^*}}. \quad (17)$$

После преобразования имеем:

$$\operatorname{ierfc}\left(\frac{R_n}{2\sqrt{a\tau^*}}\right) = \operatorname{ierfc}\left[1/\left(2\sqrt{\frac{a\tau^*}{R_n^2}}\right)\right] = \operatorname{ierfc}\left(\frac{1}{2\sqrt{Fo}}\right), \quad (18)$$

где

$$Fo = \frac{a\tau^*}{R_n^2} \quad (19)$$

критерий Фурье.

Используя подробные таблицы для функции $\operatorname{ierfc}(x)$ [7], по вычисленному значению правой части выражения (17) находим значение числа

Fo . Тогда из (19) определяем искомый коэффициент температуропроводности

$$\alpha = \frac{R_n^2}{\tau^*} Fo. \quad (20)$$

Теплопроводность находим из соотношения

$$\lambda = b\sqrt{\alpha}. \quad (21)$$

Блок-схема измерительной микропроцессорной системы (ИМС), реализующей предлагаемый метод, представлена на рис. 3.

На поверхность исследуемого строительного материала воздействуют электромагнитным полем СВЧ-диапазона (частота не менее 10 ГГц), подаваемым через рупорную антенну 1, соединенную с СВЧ-генератором с фазовой автоподстройкой частоты (ФАПЧ) 2. Приповерхностный слой 3, таким образом, нагревается через круговую область 4. При этом расстояние от рупорной антенны до поверхности подобрано так, чтобы минимизировать рассеивание электромагнитных волн в окружающую среду. Остальную поверхность объекта 3 (вне круга) теплоизолируют от окружающей среды. Бесконтактным датчиком инфракрасного диапазона 5 измеряют температуру в центре круга, цифровым термометром 6 — температуру окружающей среды. Данные поступают на порт ввода-вывода 7 и затем — на микропроцессор 8, соединенный с СВЧ-генератором. По аналитическим соотношениям (15), (20), (21) в микропроцессоре 8 определяются искомые ТФХ. Результаты в удобной форме выводят на индикатор 9.

При применении традиционного нагревателя между исследуемым образцом и нагревательным элементом возникает контактное термосопротивление, зависящее от качества обработки соприкасающихся поверхностей, т.е. величины микро- и макронеровностей, температурной деформации образца и плотности прижатия нагревателя и исследуемого объекта (контактного давления).

Контактное тепловое сопротивление (P_{KTC}) определяется по формуле [8, 9]:

$$P_{KTC} = 1/i_n, \quad (22)$$

$$i_n = i_c + i_m = \frac{\lambda_c Y}{2(h_1 + h_2)} + 8 \cdot 10^{-3} \cdot \lambda_m \left(\frac{pk}{3\sigma_B}\right)^{0,86}, \quad (23)$$

где i_c и i_m — удельные проводимости контакта среды и фактического контакта; λ_c — теплопроводность среды, заполняющей контактную зону

(воздух); h_1, h_2 — средние высоты микрошероховатостей контактирующих поверхностей; p — контактное давление; σ_b — предел прочности для более пластичного материала (в случае нихромового нагревателя); Y — относительная величина зазора; $k = 15 \cdot 10^6 / (h_1 + h_2)$; $\lambda_m = 2\lambda_1\lambda_2 / (\lambda_1 + \lambda_2)$ (λ_1, λ_2 — теплопроводности контактирующих поверхностей).

Из (23) следует, что первая составляющая проводимости определяется свойствами заполняющей среды и чистотой обработки поверхностей, а вторая — теплопроводностями контактирующих материалов.

Потери тепла, возникающие между поверхностями нагревателя и исследуемого образца, составляют

$$Q_{\text{пот}} = \Delta T_n S / P_{\text{КТС}}, \quad (24)$$

где ΔT_n — разность между температурой поверхности нагревателя и температурой в центре круга.

Зависимости контактного термосопротивления и потерь тепла от шероховатости исследуемого материала представлены на рис. 4. В таблице приведены результаты определения ТФХ строительных материалов и расчета составляющей общей погрешности измерений от влияния контактного термосопротивления между нагревателем и объектом (источник тепла — дисковый

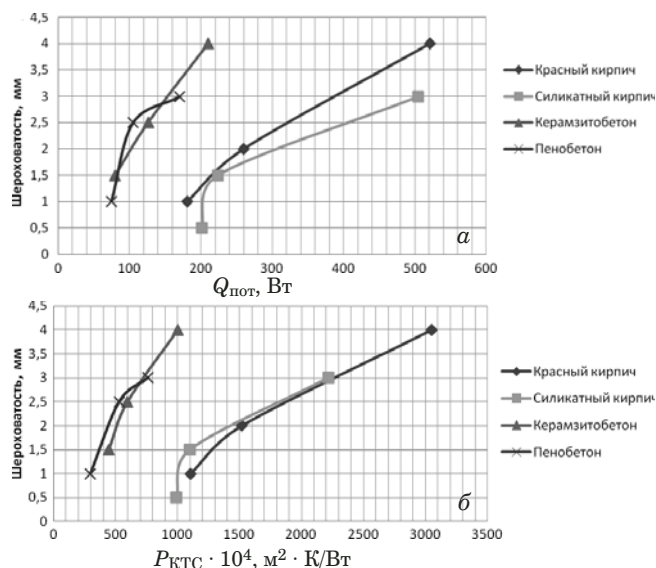


Рис. 4. Зависимости потерь тепла $Q_{\text{пот}}$ (а) и контактного сопротивления $P_{\text{КТС}}$ (б) от шероховатости исследуемого материала

нагреватель из нихрома, диаметр — 0,05, толщина — 0,005 м). Образцы нагревали при температуре окружающей среды 21 °С, тепловой поток $q_n = 12,74$ Вт/м². ТФХ определяли в лабораторных условиях (серии из трех измерений) с использованием поверенных приборов ИТ-Л-400.

Видно, что исключение влияния контактного термосопротивления на результаты контроля

Результаты определения ТФХ исследуемых строительных материалов и погрешности при различных методах исследования

Материал	Значение температурного поля в центре круга, К	Величина теплового потока с поверхности образца в окружающую среду q_1 , Вт/м ²	Метод						Уменьшение погрешности определения ТФХ предлагаемым методом по сравнению со стандартным методом (числитель) и табличными значениями (знаменатель)	
			Стандартный [12]		Предлагаемый		Табличные данные [11]		$\Delta_a, \%$	$\Delta_\lambda, \%$
			Температуропроводность $a \cdot 10^{-6}$, м ² /с	Теплопроводность λ , Вт/(м · К)	Температуропроводность $a \cdot 10^{-6}$, м ² /с	Теплопроводность λ , Вт/(м · К)	Температуропроводность $a \cdot 10^{-6}$, м ² /с	Теплопроводность λ , Вт/(м · К)		
Красный кирпич	7,34	1,61	0,393	0,630	0,386	0,702	0,362	0,657	1,78/6,22	14,1/6,41
	7,25	1,62	0,391	0,737	0,377	0,713	0,362	0,657	4,07/3,98	3,26/7,85
	7,29	1,614	0,389	0,772	0,398	0,704	0,362	0,657	2,26/9,05	8,81/6,68
Силикатный кирпич	9,59	1,07	0,539	0,819	0,601	0,777	0,558	0,721	10,3/7,15	5,13/7,21
	9,67	1,067	0,542	0,832	0,594	0,78	0,558	0,721	8,75/6,1	6,25/7,56
	9,63	1,071	0,546	0,85	0,599	0,774	0,558	0,721	8,85/6,84	8,94/6,85
Керамзитобетон	8,75	0,096	0,272	0,534	0,266	0,524	0,283	0,562	2,25/6,01	1,87/6,76
	8,64	0,097	0,270	0,539	0,257	0,518	0,283	0,562	7,14/9,18	4,05/7,83
	8,72	0,0964	0,267	0,531	0,258	0,523	0,283	0,562	3,37/8,83	1,51/6,94
Пенобетон	8,01	0,826	0,256	0,35	0,246	0,336	0,239	0,326	3,91/2,93	4,17/2,98
	7,93	0,831	0,262	0,357	0,251	0,341	0,239	0,326	4,38/4,78	4,48/4,39
	7,89	0,833	0,267	0,364	0,253	0,344	0,239	0,326	5,24/5,53	5,49/5,23

ТФХ в предлагаемом методе повышает точность определения в среднем на 6 – 8 %.

Отметим, что бесконтактный СВЧ-нагрев образца дает возможность получить результаты, независимые от шероховатости исследуемых материалов. Это исключает возможную дополнительную погрешность.

Таким образом, разработанный метод имеет существенные преимущества в точности определения ТФХ перед стандартными методами. При этом ИМС позволяет оперативно управлять всеми операциями эксперимента, определять величину тепловых потерь, автоматически внося соответствующие поправки. Все это, несомненно, делает метод удобным инструментом в практике теплофизических измерений характеристик твердых строительных материалов и изделий, строительной теплотехнике.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Чернышов В. Н., Однolkо В. Г., Чернышов А. В.** Методы и системы неразрушающего контроля теплозащитных свойств строительных материалов и изделий. — М.: Спектр, 2012. — 200 с.
2. 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.
3. **Чернышов В. Н., Чернышов А. В., Голиков Д. О.** СВЧ-метод и система оперативного контроля теплофизических характеристик строительных материалов / Вести вузов Черноземья. 2010. № 1. С. 17 – 23.
4. Пат. 2574229 РФ, МПК G 01 N 25/18. Способ неразрушающего контроля теплофизических характеристик строительных материалов и изделий / Чернышов В. Н., Чернышов А. В., Жарикова М. В.; заявитель и патентообладатель ТГТУ. — № 2014145713; заявл. 13.11.2014; опубл. 10.02.2016. Бюл. № 4.
5. **Пушнер Г.** Нагрев энергией СВЧ. — М.: Энергия, 1968. — 310 с.
6. **Карслоу Х., Егер Д.** Операционные методы в прикладной математике. — М.: Иностранная литература, 1948. — 292 с.
7. **Льков А. В.** Теория теплопроводности. — М.: Высшая школа, 1967. — 599 с.
8. **Платунов Е. С., Буравой Е. С., Курепин В. В., Петров Г. С.** Теплофизические измерения и приборы. — Л.: Машиностроение, 1986. — 256 с.
9. **Шефтель И. Т.** Термосопротивления. — М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1958. — 143 с.
10. **Франчук А. У.** Таблицы теплотехнических показателей строительных материалов. — М.: НИИ строительной физики, 1969. — 144 с.
11. СНиП II-3-79. Строительная теплотехника. — М.: Госстрой России, 1998.
12. **Жуков Н. П., Майникова Н. Ф.** Многомодельные методы и средства неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов и изделий. — М.: Машиностроение-1, 2004. — 288 с.

REFERENCES

1. **Chernyshov V. N., Odnolko V. G., Chernyshov A. V.** Methods and systems of non-destructive control of heat-protective properties of building materials and products. — Moscow: Spektr, 2012. — 200 p. [in Russian].
2. 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 owner TSTU. — N 2008145926/28; appl. 20.11.2008; publ. 20.09.2010. Bul. N 26 [in Russian].
3. **Chernyshov V. N., Chernyshov A. V., Golikov D. O.** Microwave method and system of operational control of thermal characteristics of building materials / Vesti vuzov Chernozem'ya. 2010. N 1. P. 17 – 23 [in Russian].
4. Pat. 2574229 RF, IPC G 01 N 25/18. Method of non-destructive testing of thermal characteristics of building materials and products / Chernyshov V. N., Chernyshov A. V., Zharikova M. V.; applicant and owner TSTU. — N 2014145713; appl. 13.11.2014; publ. 10.02.2016. Bul. N 4 [in Russian].
5. **Pushner G.** Heat energy of the microwave. — Moscow: Energiya, 1968. — 310 p. [in Russian].
6. **Carslaw H., Jaeger D.** Operational methods in applied mathematics. — Moscow: Inostrannaya literatura, 1948. — 292 p. [in Russian].
7. **Lykov A. V.** Theory of thermal conductivity. — Moscow: Vysshaya shkola, 1967. — 599 p.
8. **Platunov E. S., Buravoy E. S., Kurepin V. V., Petrov G. S.** Thermophysical measurements and devices. — Leningrad: Mashinostroenie, 1986. — 256 p. [in Russian].
9. **Sheftel I. T.** Thermal Resistance. — Moscow: Gos. izd. fiz.-mat. lit., 1958. — 143 p. [in Russian].
10. **Franchuk A. U.** Tables of thermal performance of building materials. — Moscow: NII stroitel'noi fiziki, 1969. — 144 p. [in Russian].
11. SNiP II-3-79. Construction heat engineering. — Moscow: Gosstroy RF, 1998 [in Russian].
12. **Zhukov N. P., Maynikova N. F.** The multi-model methods and tools impossible to ruauomoko control of thermophysical properties of materials and products. — Moscow: Mashinostroenie-1, 2004. — 288 p. [in Russian].