

## МЕТОД И СИСТЕМА ОПЕРАТИВНОГО КОНТРОЛЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

**А.В. Чернышов, Д.О. Голиков, В.Н. Чернышов**

*Кафедра «Криминалистика и информатизация правовой деятельности»,  
ГОУ ВПО «ТГТУ»; elters@crimeinfo.jesby.tstu.ru*

*Представлена членом редколлегии профессором С.В. Пономаревым*

**Ключевые слова и фразы:** коэффициент теплоотдачи; коэффициент теплопроводности; микропроцессорная система; сверхвысокочастотный нагрев; стационарный тепловой поток; строительная теплотехника; теплофизические характеристики.

**Аннотация:** Рассмотрены метод и реализующая его система определения одной из основных теплофизических характеристик строительных материалов – коэффициента теплопроводности и характеристики интенсивности конвективного теплообмена – коэффициента теплоотдачи, при использовании сверхвысокочастотного нагрева исследуемых образцов. Метод предусматривает сверхвысокочастотный нагрев материала в течение короткого промежутка времени до установления стационарного теплового потока через исследуемый образец, измерение установившихся значений температур в контролируемых точках образца, а также температуры окружающей среды и мощности отраженного от поверхности грани образца сверхвысокочастотного излучения. Используя экспериментальные данные, на основе полученных математических соотношений определяют искомые теплофизические характеристики.

---

В целях экономии топливно-энергетических ресурсов при резко возросшей стоимости энергоносителей в настоящее время в строительстве в соответствии с новыми нормативами предъявляются более высокие требования к теплозащитным характеристикам ограждающих конструкций зданий и сооружений. Так, для средней полосы России значение сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций зданий и сооружений должно быть увеличено не менее чем в два раза по сравнению со значением по старым нормативным требованиям (Постановление Министерства строительства Российской Федерации № 18-81 от 11.08.95 «О принятии изменения № 3 СНиП II-3-79 “Строительная теплотехника”»). Для обеспечения этих условий энергосбережения в строительстве возникла необходимость в создании и применении новых строительных материалов, обладающих более высокими значениями сопротивления теплопередаче, то есть более низкими коэффициентами теплопроводности и теплоотдачи.

При синтезе таких строительных материалов необходимо иметь информацию об их теплофизических характеристиках (ТФХ), так как ТФХ в этом случае являются параметрами, определяющими теплозащитные свойства и качество строительных конструкций и изделий [1]. Для получения информации о ТФХ требуется разработка новых методов и измерительных средств, позволяющих с необходимостью для строительной теплотехники точно контролировать искомые свойства

ва. Как показал информационный поиск и анализ, в настоящее время в отечественной и зарубежной строительной отрасли таких средств измерения и контроля крайне мало, поэтому разработка новых методов и реализующих их систем оперативного контроля ТФХ строительных материалов является актуальной задачей строительной теплотехники, решение которой позволит осуществить экономию топливно-энергетических ресурсов.

Разработан новый метод оперативного контроля теплофизических характеристик строительных материалов, сущность которого состоит в следующем.

Исследуемый образец 1 (рис. 1) выполняют в виде призмы квадратного сечения (параллелепипеда) с теплоизолированными боковыми гранями (теплоизолятор 2) и открытыми торцевыми гранями, через которые осуществляют симметричный нагрев образца воздействием сверхвысокочастотного (СВЧ) электромагнитного поля от излучающих антенн 3 и 4 (переменно-фазовых многощелевых излучателей).

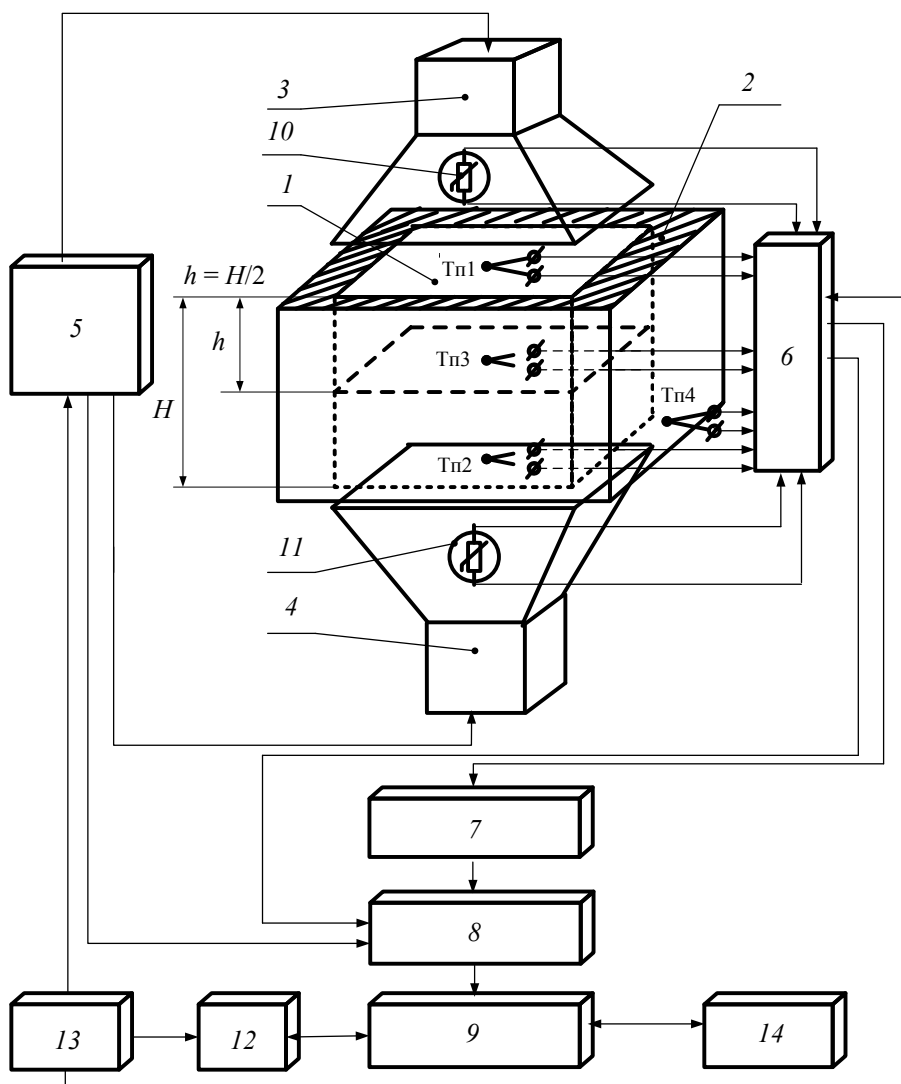


Рис. 1. Структурная схема реализации метода контроля теплофизических характеристик материалов

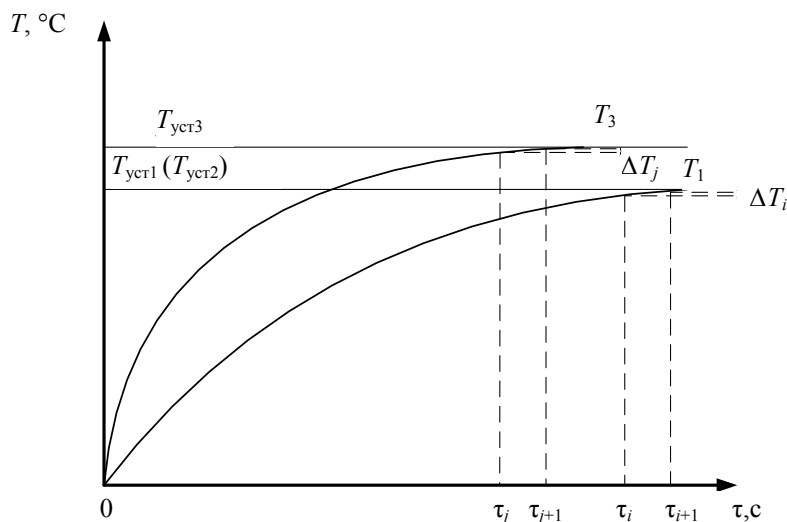
При этом контролируют изменение температуры на поверхностях открытых противоположных граней призмы с помощью термопар Тп1 и Тп2, контролируют температуру также в середине призмы термопарой Тп3, а контроль температуры окружающей среды осуществляют термопарой Тп4. Термопары Тп1 – Тп3 через коммутатор 6, нормирующий прецизионный усилитель 7 и аналого-цифровой преобразователь (АЦП) 8 подключают к микропроцессору 9.

Увеличивая мощность СВЧ-генератора, осуществляют контроль изменения температур на торцевых гранях и в середине исследуемого образца и определяют момент, при котором контролируемая в указанных точках образца температура достигнет неизменного установившегося значения  $T_{уст1}$ ,  $T_{уст2}$ ,  $T_{уст3}$  (рис. 2). В этом случае наступает тепловой баланс между количеством тепла, выделяемом в исследуемом образце при воздействии СВЧ-излучения, и количеством тепла, отводимым в окружающую среду через свободные (неизолированные) торцевые грани призмы. При этом прекращается разогрев образца, то есть в образце устанавливается стационарный одномерный тепловой поток. Для установившихся значений температур в контролируемых точках в  $i$ -й и  $j$ -й моменты времени выполняются условия:

$$\begin{aligned} \Delta T_i &= T(\tau_{i+1}) - T(\tau_i) \leq \varepsilon && \text{для } T_{уст1}(T_{уст2}); \\ \Delta T_j &= T(\tau_{j+1}) - T(\tau_j) \leq \varepsilon, \text{ где } \varepsilon = 0,01 \text{ } ^\circ\text{C} && \text{для } T_{уст3}. \end{aligned} \quad (1)$$

Измеренные термопарами Тп1 – Тп3 значения установившейся температуры заносят в микропроцессор. Измеряют с помощью термопары Тп4 температуру окружающей среды, определяют также мощность СВЧ-генератора, при которой в исследуемом образце устанавливается стационарный тепловой поток, и полученную информацию фиксируют в оперативной памяти микропроцессора 9.

Поскольку при нагреве образца часть энергии СВЧ-излучения отражается от поверхностей торцевых граней призмы, то с помощью СВЧ-ваттметров 10 и 11, помещенных в антеннах 3 и 4, измеряют мощность энергии отраженного излучения, и полученную информацию через коммутатор 6 и АЦП 8 заносят также в микропроцессор 9. Микропроцессор соединен с СВЧ-генератором 5 через цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) 12 и порт ввода-вывода 13. Данные экспери-



**Рис. 2. Определение момента наступления стационарного режима при симметричном нагреве**

мента выводятся на индикатор 14. В микропроцессоре с использованием полученной в ходе теплофизического эксперимента измерительной информации определяют искомые теплофизические характеристики исследуемого материала по математическим соотношениям, полученным на основании следующих теоретических рассуждений.

При симметричном нагреве двух противоположных граней призмы толщиной  $H$ , удельная мощность выделяемой в образце энергии в соответствии с [2] будет равна

$$p_2(x) = 2\beta p_x(1 - \gamma)\exp(-2\beta x) + 2\beta p_x(1 - \gamma)\exp(2\beta(H - x)), \quad (2)$$

где  $x$  – координата, идущая вглубь образца;  $\beta$  – коэффициент затухания электромагнитной (ЭМ) волны;  $\gamma$  – коэффициент отражения ЭМ-волны;  $p_x$  – плотность потока падающей на образец СВЧ-энергии, при которой наступает тепловой баланс.

Количество теплоты, поглощаемое образцом в единицу времени, определяется соотношением

$$Q_x = \int_0^H p_2(x) dx. \quad (3)$$

Поглощаемое тепло приводит к нагреву образца и частично рассеивается в окружающую среду в процессе теплоотдачи через свободные от изоляции грани, в результате чего создается от середины призмы к граням в направлении нормали к этим граням одномерный тепловой поток плотностью  $q = Q_x/S_2$ , где  $S_2 = 2S_1$  – суммарная площадь свободных граней;  $S_1$  – площадь одной грани.

Варьируя мощностью электромагнитного СВЧ-излучения, определяют такой тепловой (энергетический) режим, при котором выделяемое в образце тепло полностью расходуется в теплообмене с окружающей средой и не приводит к дальнейшему разогреву образца, то есть в исследуемом образце устанавливается стационарный тепловой поток.

В режиме стационарного теплового потока коэффициент теплоотдачи исследуемого материала в соответствии с [3] определяется выражением

$$\alpha = \frac{Q_x}{S_2 \Delta T_1} = \frac{Q_x}{S_2 (T_{\text{ср}} - T_4)}, \quad (4)$$

где  $Q_x$  – количество теплоты, прошедшее через поверхность площадью  $S_2$ ;  $\Delta T_1$  – разность между температурой окружающей среды  $T_4$  и средней температурой поверхностей торцевых граней  $T_{\text{ср}}$ , определяемой как  $T_{\text{ср}} = (T_1 + T_2)/2$ .

Поскольку часть СВЧ-излучения отражается от поверхности грани при нагреве образца и эти потери  $Q_{\text{пот}}$  фиксируются СВЧ-ваттметрами, то для получения более точного результата измерения коэффициента теплоотдачи исследуемого образца целесообразно использовать формулу

$$\alpha = \frac{Q_x - Q_{\text{пот}}}{S_2 \Delta T_1}, \quad (5)$$

где  $Q_{\text{пот}}$  – суммарная энергия СВЧ-излучения, отраженного от поверхностей торцевых граней призмы, определяемая как  $Q_{\text{пот}} = Q_{\text{пот}}^1 + Q_{\text{пот}}^2$ ;  $Q_{\text{пот}}^1$ ,  $Q_{\text{пот}}^2$  – потери с 1-й и со 2-й неизолированных граней.

Усреднение значения температуры в формуле (4) позволяет уменьшить долю случайной составляющей общей погрешности определения искомых теплофизических характеристик.

Искомый коэффициент теплопроводности исследуемого материала при таком тепловом режиме и условиях проведения эксперимента в соответствии с [3] определяется из уравнения

$$\lambda = - \frac{q}{\text{grad } T}, \quad (6)$$

где  $\text{grad } T$  – градиент температуры в исследуемом образце, то есть изменение температуры на единицу длины в направлении теплового потока в образце.

В данном случае  $\text{grad } T = \Delta T_2 / h$ , где  $\Delta T_2 = T_3 - T_{\text{ср}}$  – разность между температурой в среднем сечении образца (где начинается тепловой поток) и усредненной температурой поверхностей торцевых граней, через которые происходит теплоотдача;  $h$  – расстояние между свободной поверхностью грани призмы и ее средним сечением (серединой).

Для проверки работоспособности предложенного метода и реализующей его микропроцессорной системы оперативного контроля теплофизических характеристик строительных материалов были проведены эксперименты на образцах в виде куба с толщиной  $H = 10$  см, изготовленных из керамзитного бетона, силикатного и красного кирпича (табл. 1). Симметричный нагрев образца осуществлялся при температуре окружающей среды  $20$  °С.

Таблица 1

**Данные экспериментов для керамзитного бетона, силикатного и красного кирпича**

$T_{\text{ср}}$ , °С	$T_3$ , °С	$\Delta T_1$ , °С	$\Delta T_2$ , °С	$Q_x$ , Вт	$Q_x - Q_{\text{пот}}$ , Вт	$\alpha_{\text{изм}}$ , Вт/(м <sup>2</sup> °С)	$\lambda_{\text{изм}}$ , Вт/(м °С)	$\alpha_{\text{ср}}$ , Вт/(м <sup>2</sup> °С)	$\lambda_{\text{ср}}$ , Вт/(м °С)	$ \delta\alpha $ , %	$ \delta\lambda $ , %
<i>Керамзитный бетон</i>											
27,4	33,5	7,4	6,1	1,34	0,91	6,15	0,373			5,41	4,76
27,4	33,6	7,4	6,2	1,36	0,93	6,28	0,375			3,33	5,34
27,6	33,9	7,6	6,3	1,38	0,93	6,12	0,369	6,50	0,356	5,87	3,67
27,5	33,7	7,5	6,2	1,37	0,93	6,20	0,375			4,62	5,34
27,5	33,8	7,5	6,3	1,36	0,94	6,26	0,373			3,59	4,78
<i>Силикатный кирпич</i>											
29,7	36,3	9,7	6,6	2,28	1,78	9,18	0,674			4,42	5,70
29,9	36,4	9,9	6,5	2,29	1,80	9,14	0,687			4,82	3,91
29,6	36,1	9,6	6,5	2,27	1,76	9,12	0,682	9,60	0,715	5,01	4,59
29,7	36,2	9,7	6,5	2,26	1,78	9,22	0,679			3,93	4,98
29,5	36,0	9,5	6,5	2,23	1,76	9,26	0,677			3,51	5,33
<i>Красный кирпич</i>											
29,2	35,6	9,2	6,4	2,05	1,63	8,86	0,637			5,46	4,97
29,3	35,6	9,3	6,3	2,04	1,61	8,65	0,639			3,05	4,64
29,4	35,7	9,4	6,3	2,08	1,62	8,66	0,638	8,4	0,670	3,13	4,81
29,2	35,5	9,2	6,3	2,07	1,60	8,74	0,630			4,09	5,98
29,6	35,6	9,6	6,0	2,15	1,68	8,75	0,700			4,17	4,48

В разработанном методе и реализующей его системе использование для нагрева образца энергии СВЧ-излучения позволяет на порядок уменьшить время эксперимента по сравнению с известными методами и средствами данного назначения. Кроме того, разработанный метод позволяет повысить точность результатов измерений за счет устранения влияния состояния поверхности исследуемых образцов (шероховатость, степень черноты) и тепловых потерь с поверхности исследуемого образца, а также усреднения значений измеренных температур.

Кроме того, метод, основанный на симметричном нагреве образца, дает меньшее значение относительной погрешности измерений, что связано с большей равномерностью прогрева при использовании двух излучателей.

Экспериментальная проверка показала, что относительная погрешность предложенного метода не превышает 6 %.

Таким образом, разработанный метод контроля теплофизических характеристик строительных материалов по температурным измерениям на поверхностях и в центре призмы с использованием для нагрева СВЧ-излучения имеет ряд существенных преимуществ (оперативность и точность) по сравнению с известными методами указанного назначения, что, несомненно, позволит использовать его в практике теплофизических измерений, в строительной теплотехнике и других отраслях промышленности.

#### *Список литературы*

1. Тепловые методы технической диагностики строительных материалов и изделий : монография / В.Н. Чернышов [и др.]. – М. : Машиностроение-1, 2007. – 208 с.

2. Марков, А.В. Метод контроля влагосодержания при непосредственном сверхвысокочастотном нагреве / А.В. Марков, Ю.П. Юленец // Письма в ЖТФ. – 2005. – Т. 31, № 7. – С. 79–85.

3. Михеев, М.А. Основы теплопередачи / М.А. Михеев, И.М. Михеева. – М. : Энергия, 1977. – 344 с.

---

## **Technique and System for Operation Monitoring of Thermo-Physical Properties of Construction Materials**

**A.V. Chernyshov, D.O. Golikov, V.N. Chernyshov**

*Department "Criminal Law and Informational Support of Legal Activity", TSTU;  
elters@crimeinfo.jesby.tstu.ru*

**Key words and phrases:** construction heat engineering; heat-conduction coefficient; heat-transfer coefficient; high frequency heating; microprocessor system; stationary heat flow; thermo-physical properties.

**Abstract:** The paper studies the technique and the system for determining one of the basic thermo-physical properties of construction materials, i.e. heat-conduction coefficient, as well as parameters of convective heat transfer intensity, i.e. heat-transfer coefficient when applying high-frequency heating of the examined samples. The technique involves high frequency heating of material in the short period of time until the stationary heat flow through the examined sample is produced, measuring of the temperature points in controlled parts of the sample as well as the environment temperature and the capacity of the high frequency radiation reflected from the surface of the sample edge. The unknown thermo-physical properties are determined on the basis of the produced mathematical correlations and experimental data.

## References

1. Thermal methods of technical diagnostics of building materials and products: the monograph / V.N. Chernyshev [et al.]. – M. : Mashinostroenie-1, 2007. – 208 p.
2. Markov, A.V. Quality monitoring of moisture content at direct super high-frequency heating / A.V. Markov, J.P. Julenets // Letters in GTF. – 2005. – T. 31, No. 7. – P. 79–85.
3. Mikheyev, M.A. Grounds of heat transfer / M.A. Mikheyev, I.M. Mikheyeva. – Energy, 1977. – 344 p.

---

### **Methode und System der operativen Kontrolle der wärmephysikalischen Charakteristiken der Baustoffe**

**Zusammenfassung:** Es sind die Methode und das System der Bestimmung einer der wichtigsten wärmephysikalischen Charakteristiken der Baustoffe – des Koeffizienten der Wärmeleitfähigkeit und der Charakteristik der Intensität der konvektiven Wärmeübergang – des Koeffizienten der Wärmeabgabe bei der Benutzung der Super-High Frequency-Erwärmung der untersuchenden Muster betrachtet. Die Methode sieht die SHF-Erwärmung des Stoffes im Laufe der kurzen Zeitspanne bis zur Feststellung des stationären Wärmestroms durch das untersuchenden Muster, die Messung der Temperaturwerte, der Umwelttemperatur und der Leistung der reflektierten SHF-Strahlung voraus. Es werden die Experimentellangaben benutzt. Auf Grund der erhaltenen mathematischen Korrelationen werden die suchenden wärmephysikalischen Charakteristiken bestimmt.

---

### **Méthode et système du contrôle opératif des caractéristiques thermophysiques des matériaux de construction**

**Résumé:** Est examinée la méthode et son système réalisant de la définition d'une des caractéristiques thermophysiques des matériaux de construction - coefficient de la conductibilité de chaleur et caractéristique de l'intensivité du transfert de chaleur – coefficient du transfert de chaleur lors de l'utilisation du chauffage d'ultra-haute fréquence des échantillons étudiés. La méthode prévoit le chauffage d'ultra-haute fréquence du matériel au cours d'un court intervalle de temps jusqu'à l'établissement du courant thermique stationnaire à travers de l'échantillon étudié, la prise des mesures des grandeurs de températures établies dans les points contrôlés de l'échantillon ainsi que de la température de l'environnement et de la puissance d'un côté de l'échantillon du rayonnement d'ultra-haute fréquence reflété de la surface. Utilisant les données expérimentales à la base des relations mathématiques reçues on définit les caractéristiques thermophysiques recherchées.

---

**Авторы:** *Чернышов Владимир Николаевич* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Криминалистика и информатизация правовой деятельности»; *Голиков Дмитрий Олегович* – аспирант кафедры «Криминалистика и информатизация правовой деятельности»; *Чернышов Алексей Владимирович* – кандидат технических наук, ассистент кафедры «Криминалистика и информатизация правовой деятельности», ГОУ ВПО «ТГТУ».

**Рецензент** *Мордасов Михаил Михайлович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматизированные системы и приборы» ГОУ ВПО «ТГТУ».