

*Д.О. Голиков, А.В. Чернышов, М.В. Жарикова\**

## **МИКРОВОЛНОВЫЙ МЕТОД И ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Предлагается метод и реализующая его система неразрушающего контроля теплофизических характеристик (ТФХ) твердых строительных материалов и готовых изделий.

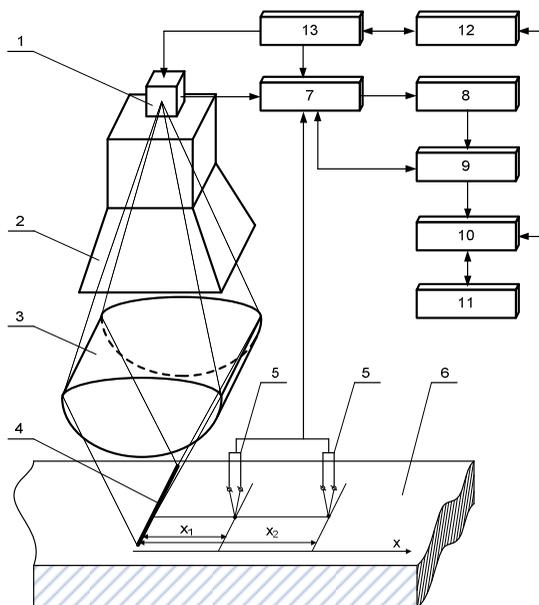
Поверхность исследуемого объекта подвергают импульсному воздействию высокочастотного электромагнитного поля (СВЧ-излучения) по линии, осуществляя нагрев исследуемого полуограниченно в тепловом отношении тела по плоскости, перпендикулярной внешней поверхности тела и уходящей внутрь этого тела. Для организации такого воздействия электромагнитное излучение рупорной антенны СВЧ-генератора фокусируют в линию линзой из диэлектрического материала. Измерительная система, реализующая предлагаемый метод, представлена на рис. 1.

Расстояние от рупорной антенны СВЧ-генератора и параметры диэлектрической линзы подобраны таким образом, чтобы обеспечить минимум рассеивания электромагнитных волн в окружающую среду и собрать фокусируемое излучение в линию на поверхности исследуемого объекта. Учитывая данные конструктивные особенности метода и проникающую способность СВЧ-излучения, обеспечивается нагрев исследуемого тела по плоскости.

Нагрев исследуемого объекта *б* осуществляется воздействием высокочастотного электромагнитного поля (СВЧ-излучением) от излучающей антенны *2* (переменно-фазовый многощелевой излучатель), соединенной волноводом с СВЧ-генератором *1*. Диэлектрическая линза *3* осуществляет фокусировку излучения в линию *4* на поверхности исследуемого тела.

---

\* Работа выполнена под руководством д-ра техн. наук, проф. ГОУ ВПО ТГТУ В.Н. Чернышова.



**Рис. 1. Система микроволнового метода неразрушающего контроля теплофизических характеристик материалов**

После СВЧ-воздействия осуществляют контроль избыточных температур на теплоизолированной от окружающей среды поверхности исследуемого объекта в двух точках, находящихся соответственно на расстояниях  $x_1$  и  $x_2$  от линии электромагнитного воздействия, термомпарами 5, которые через коммутатор 7, нормирующий прецизионный усилитель 8 и АЦП 9 подключают к микропроцессору 10.

Микропроцессор 10 соединен с СВЧ-генератором через цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) 12 и порт ввода-вывода 13. Данные эксперимента выводятся на индикатор 11. В микропроцессоре с использованием полученной в ходе теплофизического эксперимента измерительной информации определяют искомые теплофизические характеристики.

Зная мощность теплового нагрева исследуемого тела по внутренней плоскости и измеренные значения избыточных температур в контролируемых точках плоскости, теплоизолированной от окружающей среды, искомые ТФХ находят по соотношениям, полученным на основании следующих рассуждений.

Температурное поле в исследуемом полуограниченном в тепловом отношении теле при импульсном тепловом воздействии по плоскости определяются уравнением [1]:

$$T(x, \tau) = \frac{b}{2\sqrt{\pi a \tau}} \exp\left(-\frac{x^2}{4a\tau}\right), \quad (1)$$

где  $x$  – координата по оси нагрева;  $\tau$  – время нагрева;  $a$  – температуропроводность;  $b = Q/c_j$  – тепловая активность исследуемого тела;  $Q$  – удельная мощность, выделяемая на единицу площади плоскости;  $c_j$  – теплоемкость исследуемого тела.

Температурное поле в контролируемых точка  $x_1$  и  $x_2$  в заданный момент времени  $\tau^*$  после теплового воздействия описываются системой уравнений:

$$\begin{cases} T(x_1, \tau^*) = \frac{b}{2\sqrt{\pi a \tau^*}} \exp\left(-\frac{x_1^2}{4a\tau^*}\right); \\ T(x_2, \tau^*) = \frac{b}{2\sqrt{\pi a \tau^*}} \exp\left(-\frac{x_2^2}{4a\tau^*}\right). \end{cases} \quad (2)$$

$$\quad (3)$$

Поделив (2) на (3) и выполнив ряд несложных математических преобразований, получим формулу для определения коэффициента температуропроводности в виде:

$$a = \frac{x_2^2 - x_1^2}{4\tau^* \ln\left(\frac{T(x_1, \tau^*)}{T(x_2, \tau^*)}\right)}. \quad (4)$$

Используя известное соотношение  $\lambda = ac_j$  и уравнение (1), получим формулу для определения коэффициента теплопроводности:

$$\lambda = \frac{Q}{2T(x_1, \tau^*)} \sqrt{\frac{a}{\pi \tau^*}} \exp\left(-\frac{x_1^2}{4a\tau^*}\right). \quad (5)$$

Таким образом, измерив в заданный момент  $\tau^*$  после импульсного теплового воздействия на исследуемый объект по плоскости от СВЧ источника в двух точках  $x_1$  и  $x_2$  избыточную температуру поверхности этого объекта и зная мощность воздействия, по соотношениям (4) и (5) можно определить весь комплекс ТФХ.

Для проверки работоспособности предложенного метода были проведены эксперименты на строительных материалах и из керамзитного бетона, силикатного и красного кирпича. Нагрев образцов осуществлялся при температуре окружающей среды 20 °С в течение 5 с. Контроль температур производился на расстояниях  $x_1 = 1,5$  мм,  $x_2 = 3$  мм.

В таблицах 1, 2 и 3 приведены данные экспериментов соответственно для керамзитного бетона, силикатного и красного кирпича.

Таблица 1

$T_1(x_1, \tau), \text{K}$	$T_2(x_2, \tau), \text{K}$	$a \cdot 10^{-6}, \text{M}^2/\text{c}$	$\lambda, \text{BT}/(\text{M} \cdot \text{K})$	$a_{\text{справ}} \cdot 10^{-6}, \text{M}^2/\text{c}$	$\lambda_{\text{справ}}, \text{BT}/(\text{M} \cdot \text{K})$	$\delta a, \%$	$\delta \lambda, \%$
19,1	19,7	0,268	0,527	0,283	0,562	5,300	6,227
19,2	19,8	0,267	0,529	0,283	0,562	5,654	5,871
19,3	19,9	0,267	0,532	0,283	0,562	5,654	5,338
19,1	19,7	0,268	0,527	0,283	0,562	5,300	6,227
19,2	19,8	0,267	0,529	0,283	0,562	5,654	5,871

Таблица 2

$T_1(x_1, \tau), \text{K}$	$T_2(x_2, \tau), \text{K}$	$a \cdot 10^{-6}, \text{M}^2/\text{c}$	$\lambda, \text{BT}/(\text{M} \cdot \text{K})$	$a_{\text{справ}} \cdot 10^{-6}, \text{M}^2/\text{c}$	$\lambda_{\text{справ}}, \text{BT}/(\text{M} \cdot \text{K})$	$\delta a, \%$	$\delta \lambda, \%$
7,3	7,1	0,586	0,764	0,558	0,721	5,018	5,963
7,4	7,2	0,594	0,759	0,558	0,721	6,452	5,271
7,3	7,1	0,586	0,764	0,558	0,721	5,018	5,963
7,4	7,2	0,594	0,759	0,558	0,721	6,452	5,271
7,3	7,1	0,586	0,764	0,558	0,721	5,018	5,963

Таблица 3

$T_1(x_1, \tau), \text{K}$	$T_2(x_2, \tau), \text{K}$	$a \cdot 10^{-6}, \text{M}^2/\text{c}$	$\lambda, \text{BT}/(\text{M} \cdot \text{K})$	$a_{\text{справ}} \cdot 10^{-6}, \text{M}^2/\text{c}$	$\lambda_{\text{справ}}, \text{BT}/(\text{M} \cdot \text{K})$	$\delta a, \%$	$\delta \lambda, \%$
7,1	6,8	0,377	0,630	0,362	0,657	4,144	4,109
7,2	6,9	0,382	0,625	0,362	0,657	5,525	4,871
7,3	6,9	0,389	0,636	0,362	0,657	5,458	3,301
7,4	7,1	0,393	0,617	0,362	0,657	8,564	6,088
7,2	6,9	0,382	0,625	0,362	0,657	5,525	4,871

К основным преимуществам метода можно отнести:

– повышение оперативности получения результатов исследования по сравнению с методами, использующими линейный поверхностный нагрев;

- повышение точности результатов контроля, обусловленное прогревом большого объема исследуемого материала и получением усредненных по объему данных, что очень важно для строительных материалов, которые, как правило, неоднородны, дисперсны и т.д.;
- относительная простота практической реализации метода.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лыков, А.В. Теория теплопроводности / А.В. Лыков. – М. : Высш. школа, 1967.
2. Чернышов, В.Н. Тепловые методы технической диагностики строительных материалов и изделий / В.Н. Чернышов, В.Г. Однолько, А.В. Чернышов, В.М. Фокин. – М. : Издательство «Машиностроение-1», 2007. – 208 с.
3. 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.
4. Михеев, М.А. Основы теплопередачи / М.А. Михеев, И.М. Михеева. – 2-е изд, стереотипное. – М. : Энергия, 1977. – 344 с.