

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЙ БЕСКОНТАКТНЫЙ МИКРОВОЛНОВОЙ МЕТОД НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ*

М. В. Жарикова, А. В. Чернышов, В. Н. Чернышов

*Кафедра «Уголовное право и прикладная информатика в юриспруденции»,
ФГБОУ ВПО «ТГТУ»; elters@crimeinfo.jesby.tstu.ru*

Ключевые слова: бесконтактный метод; оперативность; СВЧ-излучение; температуропроводность; теплопроводность; тепловая активность.

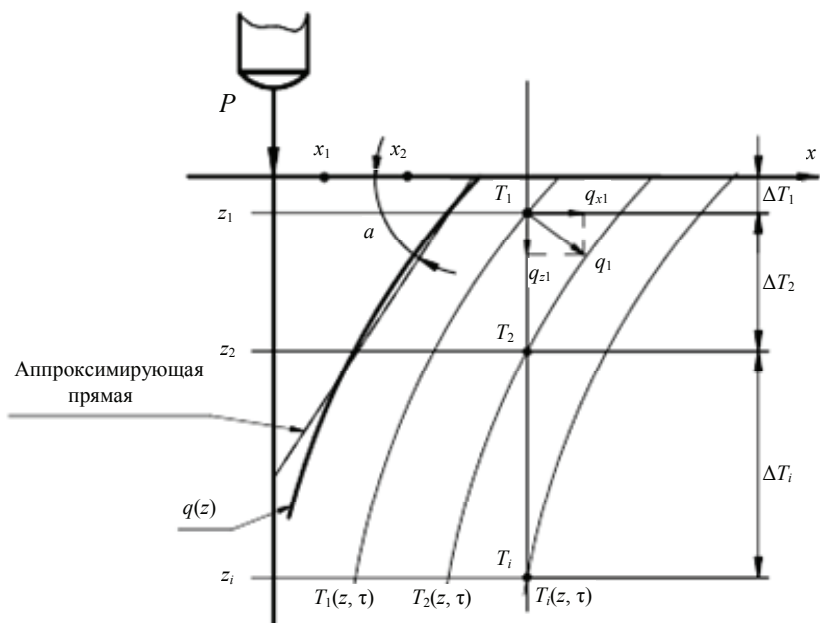
Аннотация: Рассмотрен метод и реализующая его система определения теплофизических характеристик строительных материалов при использовании сверхвысокочастотного импульсного нагрева исследуемых образцов. Метод предусматривает СВЧ-нагрев исследуемого тела, сфокусированного в линию, под углом α к плоскости поверхности полуограниченного в тепловом отношении тела в течение короткого промежутка времени, контроле избыточной температуры поверхности объекта и расчете искомых теплофизических характеристик по полученным математическим соотношениям.

В современном мире актуальным является вопрос экономии и рационального использования топливно-энергетических ресурсов. Создание надежных, точных, простых в реализации методов контроля теплофизических характеристик строительных материалов и изделий позволяет решить данную задачу. Разработка и внедрение бесконтактных неразрушающих методов и реализующих их систем помогут оперативно получать необходимые данные о теплофизических характеристиках исследуемых материалов, оценивать их качество.

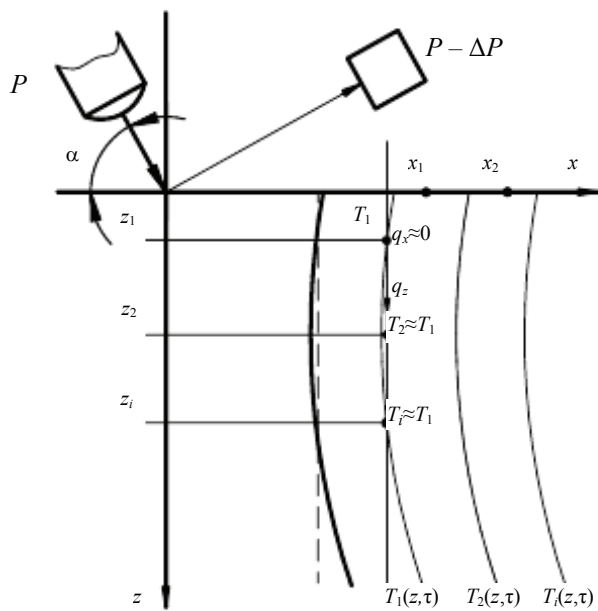
Представим способ неразрушающего контроля теплофизических характеристик строительных материалов [1], заключающийся в нагреве исследуемого изделия по линии заданных параметров, осуществляя нагрев исследуемого полуограниченного в тепловом отношении тела по плоскости, перпендикулярной плоскости внешней поверхности исследуемого объекта и уходящей внутрь него. Основным недостатком способа отсутствие учета нелинейности зависимости затухания выделяемого тепла по глубине исследуемого объекта, что порождает двумерность распространения тепла, т.е. тепловой поток q распространяется как вдоль оси $z(q_z)$, так и вдоль оси $x(q_x)$ (рис. 1, а) что является источником дополнительной методической погрешности в результатах измерения.

Электромагнитная волна, попадающая в диэлектрик с потерями, которыми являются традиционные строительные материалы (кирпич, бетон и т.д.), ослабляется в направлении распространения. Поэтому для определения мощности теплового

* По материалам доклада на конференции «Актуальные проблемы энергосбережения и энергоэффективности в технических системах».



a)



б)

Рис. 1. Нагрев исследуемого материала по плоскости:
a – перпендикулярной поверхности исследуемого материала;
б – находящейся под углом α к поверхности исследуемого материала

воздействия, участвующего в формировании контролируемого температурного поля, рассчитывают глубину проникновения поля плоской волны в материал с потерями, используя выражение для удельной мощности рассеивания в диэлектрике, приведенной в работе [2]

$$P_{\text{п}} = 0,55610^{-12} \varepsilon E^2 f, \quad (1)$$

где ε – диэлектрическая проницаемость исследуемого материала, Кл/м²; E – напряженность переменного электрического поля, В/м; f – частота излучения, Гц.

Мощность теплового воздействия по плоскости Oz (см. рис. 1, а) будет убывать по мере углубления (1). Зависимость затухания мощности тепловыделения показана в виде кривой $q(z) = f_{\text{п}}$. При этом изотермы $T(z, \tau), \dots, T(z_i, \tau_i)$ также будут иметь нелинейный вид относительно зависимости z_1 (см. рис. 1, а), что обуславливает появление температурных градиентов $\Delta T_1, \Delta T_2, \dots, \Delta T_i$, например, между точками на глубине z_1, z_2, \dots, z_i , что порождает появление тепловых потоков $q_{z1}, q_{z2}, \dots, q_{zi}$. Таким образом, в любой точке исследуемого тела, в том числе и точка контроля x_1 и x_2 , температурное поле формируется под воздействием потоков тепла по оси x и по оси z , то есть q_{xi} и q_{zi} . Для описания температурного поля в исследуемом теле используется соотношение [3]

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

где x – координата; τ – время, с; a – температуропроводность, м²/с; $b = Q/c_j$ – тепловая активность исследуемого тела, (м³·К)/(Вт·с); c_j – теплоемкость исследуемого тела, Дж/(кг·К); Q – удельная мощность, выделяемая на единицу площади плоскости, Вт/м.

Данное соотношение получено при условии равномерности плотности теплового потока по всей плоскости воздействия, поэтому неучет в прототипе двумерности теплового потока реальных тепловых процессов порождает большую методическую погрешность, что приводит к неточности получаемых результатов.

Для устранения методической погрешности тепловое воздействие на исследуемый объект, сфокусированный в линию, осуществляют под углом α к плоскости поверхности полуограниченного в тепловом отношении тела (см. рис. 1, б), значение которого получают следующим образом: на исследуемый объект воздействуют импульсом СВЧ, перпендикулярно плоскости поверхности. Расчетным путем определяют кривую затухания СВЧ-импульса в материале (по глубине). Затем аппроксимируют полученную кривую на глубину исследуемого тела, на порядок больше расстояния до более удаленной точки контроля (рис. 2).

Данный выбор участка аппроксимации обусловлен следующим. При аппроксимации всей кри-

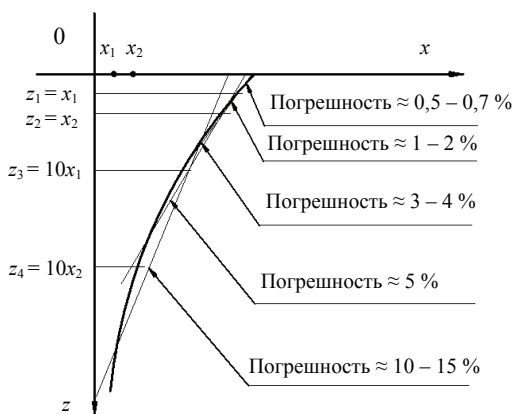


Рис. 2. Выбор участка кривой затухания для аппроксимации

вой затухания, погрешность конечных результатов будет очень большая, порядка 10...15 % (см. рис. 2). На формирование температуры в контролируемых точках поверхности изделия x_1 и x_2 , находящихся на расстоянии не более 2...3 мм от плоскости теплового воздействия, оказывает влияние только часть энергии СВЧ-генератора, выделяемая в плоскости на глубине z_4 , которая на порядок больше расстояния x_1 и x_2 . В этом случае погрешность составляет не более 5 % (см. рис. 2). При аппроксимации участка меньше выбранного по глубине, погрешность уменьшается до 1–2 %, однако, в этом случае сложно определить, какая часть энергии СВЧ-генератора участвует в формировании температурного поля в точках контроля x_1 и x_2 . Далее определяют угол между аппроксимирующей прямой и плоскостью поверхности исследуемого образца. Затем разворачивают рупорную антенну так, чтобы угол α между подаваемым импульсом СВЧ и поверхностью образца равнялся углу α и осуществляют тепловое воздействие импульсами СВЧ-излучения. После осуществляют контроль избыточных температур в двух точках контроля x_1 и x_2 .

Теплофизические характеристики (**ТФХ**) определяют по следующим формулам:

$$a = \frac{x_1^2 (\tau_2 - \tau_1)}{4\tau_1\tau_2} \left[\ln \frac{T(x_1, \tau_1)\sqrt{\tau_1}}{T(x_1, \tau_2)\sqrt{\tau_2}} \right]^{-1}, \quad (3)$$

где x_1 – координата; τ_1 и τ_2 – два момента времени, замеряемых термоприемником, после воздействия СВЧ-импульса; $T(x_1, \tau_1)$, $T(x_1, \tau_2)$ – температурное поле в точке x_1 в два момента времени τ_1 и τ_2 ;

$$\lambda = \frac{1}{2} \frac{Q_{\text{и}}}{T_2(x_1, \tau_1) - T_1(x_2, \tau_2)} \exp\left(-\frac{x_1^2}{4a\tau_1}\right), \quad (4)$$

где λ – теплопроводность, Вт/(м·К); $Q_{\text{и}}$ – мощность источника СВЧ, Вт/м².

Устройство, реализующее предлагаемый способ, представлено на рис. 3.

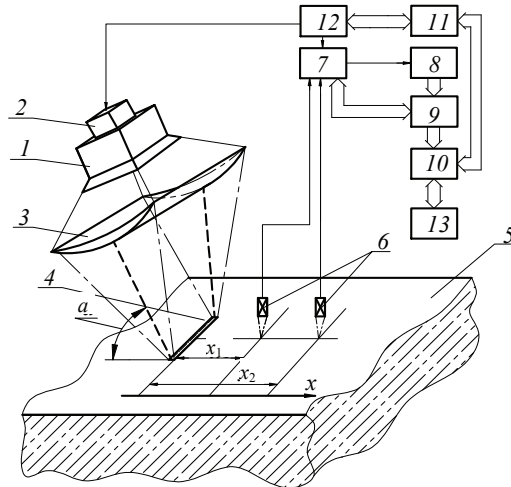


Рис. 3. Система бесконтактного микроволнового метода неразрушающего контроля ТФХ материалов

Данные экспериментов для силикатного кирпича

Данные, полученные в ходе эксперимента		Данные прототипа				Справочные данные			
$a \cdot 10^{-6}$, м ² /с	λ , Вт/(м·К)	$a \cdot 10^{-6}$, м ² /с	λ , Вт/(м·К)	δa , %	$\delta \lambda$, %	$a \cdot 10^{-6}$, м ² /с	λ , Вт/(м·К)	δa , %	$\delta \lambda$, %
0,546	0,701	0,569	0,729	4,042	3,841			2,151	2,774
0,532	0,696	0,542	0,709	1,833	1,391			4,659	3,467
0,550	0,703	0,575	0,714	4,348	1,541	0,558	0,721	1,433	2,496
0,545	0,708	0,587	0,731	7,155	3,146			2,329	1,803
0,525	0,713	0,533	0,692	1,501	2,440			5,914	1,109

Для проведения микроволнового воздействия на исследуемый образец электромагнитные излучения рупорной антенны 1 СВЧ-генератора 2 фокусируют линзой 3 из радиопрозрачного диэлектрического материала в линию заданной длины 4. При этом выставляют рупорную антенну 1 под углом α к поверхности исследуемого материала. Нагрев исследуемого объекта 5 осуществляется импульсным воздействием высокочастотного электромагнитного поля (СВЧ-излучением) длительностью 5...10 с от излучающей антенны 1, соединенной волноводом с СВЧ-генератором 2. 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 6, которые через коммутатор 7, нормирующий прецизионный усилитель 8 и цифроаналоговый преобразователь (ЦАП) 9 подключают к микропроцессору 10, который соединен с СВЧ-генератором 2 через ЦАП 11 и порт ввода-вывода 12. Данные эксперимента выводятся на индикатор 13 (табл.).

Основным преимуществом по сравнению с методом, описанным в работе [1], является уменьшение методической погрешности, обуславливаемой нелинейностью зависимости затухания выделяемого тепла по глубине исследуемого объекта, порождающей двумерность распространения тепла. Следовательно, повышается точность полученных результатов.

Таким образом, разработанный метод определения теплофизических характеристик строительных материалов имеет существенное преимущество при точности определения теплофизических характеристик перед известными способами указанного назначения, что, несомненно, позволит использовать его на практике для теплофизических измерений, строительной теплотехнике и различных отраслях промышленности.

Список литературы

1. Пат. 2399911 Российская Федерация, 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 Тамб. гос. техн. университет. – № 2008145926/28 ; заявл. 20.11.2008 ; опубл. 20.09.2010, Бюл. № 26. – 10 с.
2. Пюшнер, Г. Нагрев энергией СВЧ / Г. Пюшнер. – М. : Энергия, 1968. – 312 с.
3. Лыков, А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков. – М. : Высшая школа, 1967. – 600 с.

Noncontact Energy Efficient Microwave Method of Nondestructive Testing of Thermal Physical Characteristics of Building Materials and Products

M. V. Zharikova, A. V. Chernyshov, V. N. Chernyshov

*Department «Criminal Law and Applied Computer Science in Law»,
TSTU; elters@crimeinfo.jesby.tstu.ru*

Keywords: microwave radiation; noncontact method; operational efficiency; thermal conductivity; thermal diffusivity; thermal activity.

Abstract: The authors explore the method and the system that is used for its implementation to determine thermal properties of building materials using microwave pulse heating of samples. The method involves microwave heating of the body under study, focused in a line at angle α to the plane surface bounded in the heat of the body within a short period of time, control of the excess surface temperature of the object and calculation of the desired thermal characteristics obtained by mathematical ratios.

References

1. Chernyshov V.N., Golikov D.O., Chernyshov A.V. Tambov State Technical University (2010), *Sposob opredeleniya teplofizicheskikh kharakteristik stroitel'nykh materialov (varianty)* (A method of determining the thermal characteristics of building materials (options)), Russian Federation, Pat. 2399911.
2. Pyushner G. (1968), *Nagrev energiei SVCh* (The heating of the microwave energy), Moscow: Energiya.
3. Lykov A.V. (1967), *Teoriya teploprovodnosti* (The theory of thermal conductivity), Moscow: Vysshaya shkola.

Energieeffektive berührungslose Mikrowellenmethode der nichtzerstörenden Kontrolle der wärmephysikalischen Charakteristiken der Baustoffe und Erzeugnisse

Zusammenfassung: Es ist die Methode und sie realisierendes System der Bestimmung der wärmephysikalischen Charakteristiken der Baustoffe bei der Verwendung des Super-High Frequency-Erwärmungsimpulses der untersuchenden Muster betrachtet. Bei dieser Methode wird die SHF-Erwärmung des in die Linie fokussierten untersuchenden Körpers unter dem Winkel α zur Ebene der Oberfläche des in dem Wärmeverhältnis halbbegrenzten Körpers im Laufe der kurzen Zeit, die Kontrolle der Übertemperatur der Objektoberfläche und die Berechnung der suchenden wärmephysikalischen Charakteristiken nach den erhaltenen mathematischen Korrelationen vorgesehen.

Méthode sans contact à micro-ondes économe en énergie du contrôle non-destructif des caractéristiques thermophysiques des matériaux et des articles de construction

Résumé: Est examinée la méthode et le système la réalisant qui définit les caractéristiques thermophysiques des matériaux de construction lors du chauffage à impulsion à haute fréquence des échantillons étudiés. La méthode prévoit le chauffage

à micro-ondes du corps étudié concentré en ligne sous l'angle α envers la surface du corps semi-limité dans le rapport thermique durant une courte période du temps, le contrôle de température abondante de la surface de l'objet et le calcul des caractéristiques thermophysiques recherchées d'après les relations mathématiques reçues.

Авторы: *Жарикова Мария Валерьевна* – аспирант кафедры «Уголовное право и прикладная информатика в юриспруденции»; *Чернышов Алексей Владимирович* – кандидат юридических наук, доцент кафедры «Уголовное право и прикладная информатика в юриспруденции»; *Чернышов Владимир Николаевич* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Уголовное право и прикладная информатика в юриспруденции», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».

Рецензент: *Чуриков Александр Алексеевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Управление качеством и сертификация», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».
