

**МЕТОД НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ
МНОГОСЛОЙНЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

В.Н. Чернышов¹, А.В. Чернышов²

*Кафедры: “Криминалистика и информатизация правовой деятельности” (1),
“Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем” (2), ТГТУ*

Ключевые слова и фразы: многослойные строительные конструкции; неразрушающий контроль; погрешность измерения; теплофизические характеристики.

Аннотация: Разработан метод неразрушающего контроля теплофизических свойств многослойных строительных конструкций, позволяющий оперативно определить основные теплотехнические характеристики наружных ограждающих конструкций с необходимой для такого вида измерений точностью.

Обозначения

a – коэффициент температуропроводности, м ² /с;	$\delta\lambda, \delta a$ – погрешности измерений теплопроводности, %;
F – частота тепловых импульсов, Гц;	λ – коэффициент теплопроводности материала, Вт/(м·К);
Q, q_i – тепловой поток, Вт/м ² ;	τ – время, с;
R_i – толщина i -го слоя конструкции, м;	$\int \dots dz$ – кратный интеграл вероятности.
$T(x, \tau)$ – контролируемая избыточная температура, К;	

С целью экономии топливно-энергетических ресурсов в строительстве и энергосбережения ресурсов в сфере жилищно-коммунального хозяйства был принят Федеральный закон “Об энергосбережении” № 28-13 от 03.04.1996, в соответствии с которым введена система паспортизации зданий и их ограждающих конструкций, регламентирующая параметры теплозащиты здания. До настоящего времени оценка тепловых характеристик осуществляется расчетным путем по проектно-информационным показателям ограждающих конструкций, а также выборочно лабораторным способом на отдельных фрагментах.

При резко возросшей стоимости энергоносителей такая оценка уже не удовлетворяет требованиям потребителей, так как не учитывает случайные изменения теплофизических характеристик строительных материалов и конструкций. Она должна получаться на основании контроля конкретной строительной конструкции, как минимум на двух этапах: после изготовления в процессе сдачи в эксплуатацию и через определенный срок эксплуатации. Это относится в первую очередь к наружным ограждающим конструкциям: стеновым панелям, стыковым соединениям, элементам кровли и другим, через которые идут основные теплотери здания. Поэтому одной из основных задач, стоящих перед контролерами качества строительных конструкций, в настоящее время является определение соответствия их теплотехнических характеристик (в основном по сопротивлению теплопередаче и теплопотерям) нормативным документом СНиП, МГСН и др. Для решения этой задачи необходимо создавать методы и технические средства оперативного неразрушающего контроля, обеспечивающие определение теплотехнических характеристик многослойных наружных ограждающих конструкций, в первую очередь, наиболее важных из этих характеристик – сопротивление R и приведенное сопротивление Rr теплопередаче [1-3].

В статье описывается метод оперативного неразрушающего контроля теплофизических характеристик многослойных строительных конструкций (стенных панелей) в реальных условиях эксплуатации. Сущность предлагаемого метода заключается в следующем.

На каждую из наружных поверхностей полубесконечной в тепловом отношении многослойной конструкции устанавливаются по одному зонду, в плоскости контакта первого из которых расположены дисковый нагреватель ДН и два линейных нагревателя ЛН1 и ЛН2, закрепленные на небольшом (1-2 мм) заданном расстоянии от дискового нагревателя, а также термопара Тп1, помещенная в центр контактной плоскости дискового нагревателя и две термобатареи Тб1 и Тб2, расположенные по линии на заданном расстоянии x_1 соответственно от линейных источников ЛН1 и ЛН2 (см. рис. 1). В плоскости контакта второго термозонда расположены датчик теплового потока Tq и на небольшом расстоянии от него два линейных нагревателя ЛН3 и ЛН4, кроме того, на заданном расстоянии x_1 от линии действия последних помещены термобатареи Тб3 и Тб4 соответственно, а в центре круга датчика теплового потока вмонтирована вторая термопара Тп2.

Нагреватели, термопары и термобатареи как первого, так и второго зондов закрыты по внешней от контактной плоскости стороне теплоизоляционным материалом типа рипора или асбеста, обеспечивая направленное движение тепловых потоков на наружную поверхность конструкции и препятствуя теплообмену в других направлениях, тем самым обеспечивая реализацию адиабатического режима нагрева. Зонды поджимаются к наружной поверхности исследуемого изделия определенным усилием, сообщаемым грузом или пружиной (на чертеже не показаны). На рис. 1 обозначены 1-4 – порядковые номера поверхностей слоев, R1-R3 – толщины слоев. Расстояние x_1 от линейных нагревателей до термобатарей берется в 3-5 раз меньше соответственно толщин слоев R1 и R3, т.к. в этом случае на результаты измерения температурных полей от действия линейных источников тепла практически не скажется влияние внутреннего (второго) слоя конструкции, т.е. первый и третий слой с большой достоверностью можно считать полубесконечными телами относительно тепловых процессов, обусловленных действием линейных источников тепла.

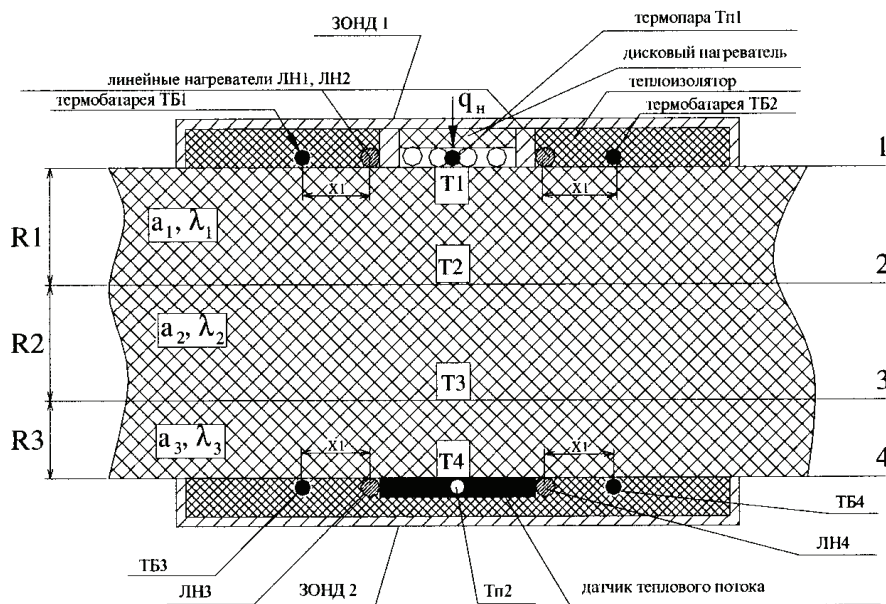


Рис. 1 Физическая модель метода неразрушающего контроля теплофизических характеристик строительных материалов многослойных конструкций

Определение ТФХ наружных слоев конструкций осуществляют в соответствии с алгоритмом измерения, сущность которого заключается в следующем [4]. В начале осуществляют тепловое воздействие одиночным тепловым импульсом заданной мощностью q , которая составляет не более 10-15 % от мощности $Q_{\text{терм}}$, при которой температура на линии действия источника тепла достигнет значения температуры термодеструкции материала покрытия, и определяют время релаксации $\tau_{\text{рел}}$ температурного поля в точке поверхности исследуемого тела, расположенной на заданном расстоянии x_1 от линии действия источника тепла. Затем определяют минимальную частоту следования тепловых импульсов в соответствии с зависимостью $F_{\text{мин}} = K / \tau_{\text{рел}}$, где K - коэффициент, задаваемый в диапазоне от 2 до 5, $\tau_{\text{рел}}$ - интервал времени от момента нанесения теплового импульса до момента, когда избыточная температура в точке контроля станет равной порогу чувствительности контрольно-измерительной аппаратуры. Осуществляют тепловое воздействие от линейного источника тепла, увеличивая частоту тепловых импульсов в соответствии с законом

$$F_{\text{имп}} = F_{\text{мин}} + K_1 \Delta T_i + \frac{1}{K_2} \int_{\tau_{i-1}}^{\tau_i} \Delta T(\tau) d\tau + K_3 \left. \frac{d[\Delta T(\tau)]}{d\tau} \right|_{\tau=\tau_i}, \quad (1)$$

где $\Delta T(\tau) = T_{\text{зад1}} - T(\tau)$ - разность между наперед заданным значением $T_{\text{зад1}}$ и текущим значением контролируемой температуры; $\Delta T_i = T_{\text{зад1}} - T(\tau_i)$ - разность между заданной и текущей температурой в моменты времени, определяемые соотношением $\tau_i = K_4 \sum_{k=1}^{i-1} \Delta T_k + \tau_{\text{мин}}$, где $K_1 \div K_4$ - коэффициенты пропорциональности, значения которых определяются экспериментально на эталонных изделиях, либо задаваемые соответственно в диапазоне $K_1 = 1 \div 10$; $K_2 = 1 \div 100$; $K_3 = 1 \div 50$; $K_4 = 0,1 \div 1$; $\tau_{\text{мин}}$ - минимальный интервал времени определения разности ΔT_i (задается от 1 до 3 с).

Увеличение частоты следования тепловых импульсов в соответствии с законом (1) осуществляют до тех пор, пока установившееся квазистационарное значение температуры в точке контроля достигнет наперед заданного значения $T_{\text{зад1}}$, то есть $\Delta T_i = T_{\text{зад1}} - T(\tau_i) = 0$. Установившееся значение температуры в точке контроля достигается тогда, когда очередной тепловой импульс из серии импульсов, подаваемых линейным источником, изменяет температуру в этой точке на величину, меньшую порога чувствительности ε контрольно-измерительной аппаратуры ($\varepsilon \leq 0,01$ °С). Определяют частоту тепловых импульсов F_{x1} , после чего начинают увеличение частоты тепловых импульсов до тех пор, пока значение избыточной контролируемой температуры в той же точке x_1 не достигнет второго, наперед заданного значения $T_{\text{зад2}}$. Определяют при этом частоту тепловых импульсов F_{x2} , а искомые ТФХ рассчитывают по формулам, полученным следующим образом.

Равенство квазистационарной температуры в точке контроля x_1 наперед заданным значениям $T_{\text{зад1}}$ и $T_{\text{зад2}}$ при адаптивном изменении частоты импульсов будут выражаться соотношениями [2]:

$$T_{\text{зад } 1} = \frac{QF_{x1}}{2\pi\lambda} \left(\sum_{i=1}^{n_1} \frac{1}{i} - \frac{x_1^2 F_{x1}}{4a} \sum_{i=1}^{n_1} \frac{1}{i^2} \right), \quad (2)$$

$$T_{\text{зад } 2} = \frac{QF_{x2}}{2\pi\lambda} \left(\sum_{i=1}^{n_2} \frac{1}{i} - \frac{x_1^2 F_{x2}}{4a} \sum_{i=1}^{n_2} \frac{1}{i^2} \right). \quad (3)$$

Поделив (2) на (3), получим выражение для теплопроводности

$$a = \frac{x_1^2}{4} \frac{T_{\text{зад. } 1} F_{x2}^2 \sum_{i=1}^{n_2} \frac{1}{i^2} - T_{\text{зад. } 2} F_{x1}^2 \sum_{i=1}^{n_1} \frac{1}{i^2}}{T_{\text{зад. } 1} F_{x2} \sum_{i=1}^{n_2} \frac{1}{i} - T_{\text{зад. } 2} F_{x1} \sum_{i=1}^{n_1} \frac{1}{i}}. \quad (4)$$

Для определения коэффициента теплопроводности найденное значение коэффициента теплопроводности подставляют в соотношение, описывающее температурное поле при действии тепловых импульсов от линейного источника на поверхность полубесконечного в тепловом отношении тела

$$\lambda = \frac{QF_{x1}}{2\pi T_{\text{зад } 1}} \sum_{i=1}^{n_2} \frac{1}{i} \exp\left(-\frac{x_1^2 F_{x1}}{4ai}\right). \quad (5)$$

Таким образом, используя соотношения (4) и (5) и имея информацию о частоте тепловых импульсов F_{x1} и F_{x2} для первого наружного слоя и о частотах F_{x3} и F_{x4} для второго наружного слоя, легко определить ТФХ обоих наружных слоев.

Для определения ТФХ материалов внутреннего слоя конструкции включают дисковый нагреватель ДН и осуществляют подвод к поверхности конструкции удельного теплового потока через круг до тех пор, пока на противоположной поверхности конструкции появится тепловой поток. Измеряют при этом величину установившегося теплового потока q , а также температуру в плоскостях 1 и 4 с помощью термомпар Тп1 и Тп2.

Перепад температур на первом слое конструкции в соответствии с [5] определяется как

$$\Delta T = T_1 - T_2 = q, \frac{R_1}{\lambda_1}. \quad (6)$$

Отсюда температура в плоскости 2 определяется из соотношения

$$T_2 = T_1 - q, \frac{R_1}{\lambda_1}. \quad (7)$$

Аналогично (6) температура в плоскости 3 определяется из соотношения

$$T_3 - T_4 = q, \frac{R_3}{\lambda_3},$$

т.е.

$$T_3 = T_4 + q, \frac{R_3}{\lambda_3}. \quad (8)$$

Используя выражения (7) и (8), перепад температуры на внутреннем слое конструкции определяется выражением

$$T_2 - T_3 = q, \frac{R_2}{\lambda_2}. \quad (9)$$

Из выражения (9) искомый коэффициент теплопроводности внутреннего слоя конструкции определяется по соотношению

$$\lambda_2 = \frac{q, R_2}{(T_2 - T_3)}. \quad (10)$$

Для определения коэффициента температуропроводности внутреннего слоя конструкции используем аналитическое решение [6], описывающее распределение температуры по толщине R_2 слоя материала и во времени τ при использовании модели полупространства и имеющее вид:

$$T_2 - T_3 = \Delta T(R_2, \tau) = \frac{2q}{\lambda} \sqrt{a_2 \tau} \operatorname{ierfc} \left(\frac{R_2}{2\sqrt{a_2 \tau}} \right). \quad (11)$$

Имея информацию о λ и q , и используя известные подробные таблицы для определения функции кратного интеграла вероятности $\operatorname{ierfc} z$, численным методом из выражения (11) легко определить искомый коэффициент температуропроводности a_2 .

Таким образом, имея информацию о мощности и частоте тепловых импульсов линейного источника тепла и измерив температуру в заданных точках поверхности исследуемого изделия, по соотношениям (4) и (5) определяем ТФХ наружных слоев конструкции, а измерив тепловой поток на противоположной от дискового нагревателя стороне изделия и температуры на обеих внешних сторонах конструкции при действии дискового нагревателя, по соотношениям (10) и (11) определяем ТФХ внутреннего слоя конструкции.

Для проверки работоспособности предложенного метода неразрушающего контроля ТФХ были проведены эксперименты на трехслойном изделии, наружные слои которого выполнены из полиметилметакрилата, а внутренний – из рипора.

Данные эксперимента для наружных слоев конструкции приведены в табл. 1, а для внутреннего слоя - в табл. 2.

Таблица 1

	Q	n_1	n_2	$T_{\text{сaa1}}$	$T_{\text{сaa2}}$	F_{x1}	F_{x2}	$\lambda_{1,3}$	$a_{1,3}$	$\delta\lambda, \%$	$\delta a, \%$
Наружный слой №1	0,5	42	78	30	50	8,6	12,4	0,186	$1,05 \cdot 10^{-7}$	4,6	7
Наружный слой №2	0,5	44	81	30	50	8,4	12,3	0,187	$1,07 \cdot 10^{-7}$	4,1	5,3

Таблица 2

	T_1	T_2	T_3	T_4	q_n	λ_2	a_2	$\delta\lambda_2, \%$	$\delta a_2, \%$
Внутренний слой	64	60,7	25,1	21,8	32	0,026	$4,86 \cdot 10^{-7}$	3,7	5,65

Экспериментальная проверка показала корректность основных теоретических выводов, положенных в основу предложенного метода неразрушающего контроля ТФХ материалов, и позволяет сделать вывод о том, что рассмотренный в статье метод найдет широкое применение при определении теплозащитных свойств многослойных строительных конструкций зданий и сооружений.

Список литературы

1. МГСН 2.01-99. Энергосбережение в зданиях. Нормативы по теплозащите и тепловодоснабжению.
2. СНиП II-3-79*. Строительная теплотехника / Госстрой СССР. - М.: Стройиздат, 1998.
3. ГОСТ 26154-84. Здания и сооружения. Методы определения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций.
4. А.с. № 1402892 СССР, МКИ G 01 N 25/18. Способ неразрушающего контроля теплофизических характеристик материалов и устройство для его осуществления / В.Н. Чернышов и др. № 4129719/31-25; Заявл. 26.06.86; Опубл. 15.06.88, Бюл. № 22. - 12 с.
5. Чернышова Т.И., Чернышов В.Н. Методы и средства неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов. - М.: Машиностроение, 2001. - 240 с.
6. Дульнев Г.Н. Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре. - М: Высш. шк., 1984. - 247 с.
7. Козлов В.П. Двумерные осесимметричные нестационарные задачи теплопроводности / Под ред. А.Г. Шашкова. - Мн.: Наука и техника, 1986. - 392 с.

Non-destructive Control Method of Thermophysical Characteristics of Building Materials for Multilayer Structures

V.N. Chernyshov, A.V. Chernyshov

Departments: «Criminal Law and Legal Activity Informatisation» (1), «Design of Radioelectronic and Microprocessor Systems» (2), TSTU

Key words and phrases: multilayer structures; non-destructive control; measurement error; thermophysical characteristics.

Abstract: Non-destructive control method of thermophysical characteristics for multilayer building structures is developed; it allows to determine operatively basic thermophysical characteristics of external fence structures with the necessary accuracy for such measurements.

Methode der ununterbrochenen Kontrolle der wärme-physikalischen Charakteristiken der Baustoffe der vielschichtigen Konstruktionen

Zusammenfassung: Es ist die Methode der ununterbrochenen Kontrolle der wärme-physikalischen Eigenschaften der vielschichtigen Baukonstruktionen erarbeitet. Sie erlaubt die wärme-technischen Hauptcharakteristiken der äußeren Schützkonstruktionen mit der für solche Art der Messung erforderlichen Genauigkeit operativ zu bestimmen.

Méthode du contrôle non destructif des caractéristiques physiques des matériaux de construction multicouches

Résumé: On a élaboré la méthode du contrôle non destructif des propriétés thermophysiques des matériaux de construction multicouches qui permet de déterminer tout de suite des caractéristiques thermotechniques des constructions extérieures reflétantes avec une précision nécessaire pour cet espèce.