

МЕТОД НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МНОГОСЛОЙНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ

В.Н. Чернышов, Э.В. Сысоев, А.В. Чернышов

*Кафедра «Криминалистика и информатизация правовой деятельности»,
ГОУ ВПО «ТГТУ»*

Представлена членом редколлегии профессором С.В. Пономаревым

Ключевые слова и фразы: неразрушающий контроль; теплофизические свойства; тепловые потери; точечный источник тепла.

Аннотация: Предложен новый метод неразрушающего контроля теплофизических свойств трехслойных строительных конструкций и изделий, отличающийся высокой оперативностью и точностью измерений за счет использования комбинированного подхода.

В настоящее время в целях экономии топливно-энергетических ресурсов при резко возросшей стоимости энергоносителей в строительной теплотехнике широко используются многослойные ограждающие конструкции (стенные панели, наружные перекрытия, полы, элементы кровли и т.д.), через которые идут основные теплотери зданий и сооружений. Поэтому одной из основных задач, стоящих перед контролерами качества строительных конструкций, является определение соответствия их теплозащитных свойств (в основном, по сопротивлению теплопередаче и теплотерям) нормативным документам СНиП, МГСН и др. Кроме того, при разработке, испытании и эксплуатации таких многослойных изделий необходимо иметь информацию о теплозащитных свойствах как отдельных слоев, так и теплозащитной конструкции в целом, так как эти свойства в этом случае являются параметрами, определяющими качество таких изделий.

Для решения этих актуальных задач строительной теплотехники был разработан новый метод неразрушающего контроля (НК) теплофизических свойств (ТФС) трехслойных строительных конструкций, отличающийся высокой оперативностью и точностью измерений за счет использования комбинированного подхода, в котором ТФС наружных слоев определяются бесконтактным методом [1], а ТФС внутреннего слоя – контактным методом [2].

Сущность предложенного метода состоит в следующем. Для определения ТФС первого наружного слоя строительной конструкции 1 над ним помещают точечный источник тепловой энергии 2 (лазер) и два термоприемника 3 и 4 (рис. 1), сфокусированных на поверхность, подверженную тепловому воздействию, и регистрирующих температуру этой поверхности по ее электромагнитному излучению. Причем термоприемник 4 установлен от источника 2 на расстоянии R_2 , которое меньше значения толщины h_1 наружного слоя строительной конструкции. Этим обеспечивается такой режим нагрева, при котором исследуемый наружный слой конструкции можно считать полубесконечным в тепловом отношении телом, так как на тепловой режим в этом случае не будут оказывать влияние остальные слои строительной конструкции и, в первую очередь, внутренний слой.

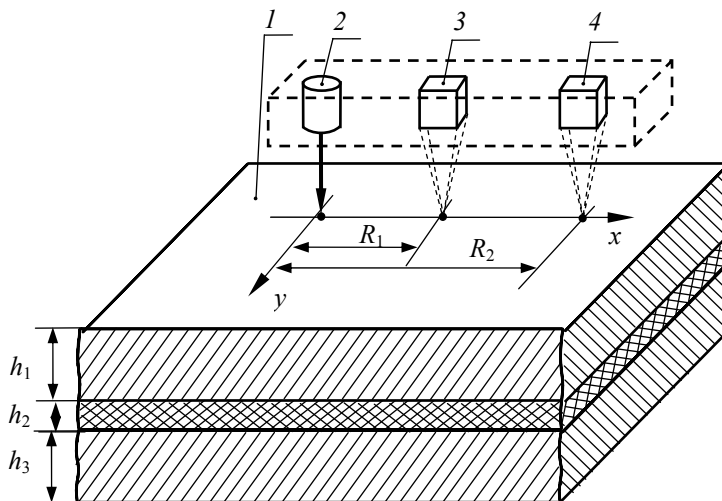


Рис. 1. Схема расположения источника тепла и термодатчиков при бесконтактном определении ТФС наружных слоев трехслойной строительной конструкции

Первоначально термодатчиками 3, 4 измеряют температуру поверхности исследуемого объекта. Одновременно с этим, используя высокоточный электронный термометр, измеряют температуру окружающей среды. По полученным данным об этих температурах определяют коэффициент k , зависящий от степени черноты ε поверхности исследуемых образцов и прозрачности β окружающей среды, разделяющей поверхность исследуемых объектов и термодатчики. Подробно об этом изложено ниже. Найденное значение k используется для введения поправок при расчете искомых ТФС.

Далее включают источник энергии 2 и производят нагрев. Причем, мощность источника тепла $q_{и.т}$ определяется до начала эксперимента по предложенной ранее методике [2], что обеспечивает гарантию сохранения целостности исследуемого слоя. В заданный момент времени τ_1 (формула для расчета его величины будет приведена ниже) термодатчиками 3, 4 производят измерение избыточных температур T_1, T_2 в точках контроля, расположенных на расстояниях R_1 и R_2 соответственно от центра пятна нагрева.

Затем продолжают нагрев до тех пор, пока в некоторый момент времени τ_x термодатчик 4 не зафиксирует увеличение избыточной температуры в точке R_2 до величины $T_{2зад} = mT_2$. Коэффициент m задается перед началом эксперимента таким, чтобы, с одной стороны, разница между температурами $T_{2зад}$ и T_2 была приблизительно на порядок выше чувствительности измерительной аппаратуры ($m \geq 1,05$), а с другой – чтобы коэффициент m не превышал 1,15 [2]. Как показали исследования, невыполнение последнего условия ведет к увеличению времени измерений и снижению их точности. Используя измеренные параметры T_1, T_2 и τ_x , определяют искомые теплофизические свойства по зависимостям, полученным на основании следующих рассуждений.

Известно [1, 2], что распределение избыточной температуры в полубесконечном в тепловом отношении теле при действии на него точечного источника тепла, с учетом тепловых потерь с поверхности тела в окружающую среду, определяется следующей зависимостью

$$\begin{cases} T(R, \tau) = \frac{kq_{и.т} - q_{кл}}{4\pi\lambda R} \left(1 - \frac{R}{\sqrt{\pi a \tau}} \right), \\ \frac{R}{\sqrt{\tau}} \leq 0,0003, \end{cases} \quad (1)$$

где $T(R, \tau)$ – температура в рассматриваемой точке, К; τ – время с момента начала действия источника тепла, с; $k = \varepsilon\beta$; $q_{кл} = q_{к} + q_{л}$ – суммарные потери, вызванные конвективным и лучистым теплообменом поверхности тела с окружающей средой.

В соответствии с выражением (1) измеряемые в момент времени τ_1 избыточные температуры в точках R_1 и R_2 будут определяться соответственно следующими выражениями:

$$T_1(R_1, \tau_1) = \frac{kq_{и.т} - q_{кл1}}{4\pi\lambda R_1} \left(1 - \frac{R_1}{\sqrt{\pi a \tau_1}} \right); \quad (2)$$

$$T_2(R_2, \tau_1) = \frac{kq_{и.т} - q_{кл1}}{4\pi\lambda R_2} \left(1 - \frac{R_2}{\sqrt{\pi a \tau_1}} \right). \quad (3)$$

После математических преобразований выражений (2) и (3) получим формулу для расчета температуропроводности исследуемых объектов в следующем виде

$$a = \frac{1}{\pi\tau_1} \left(\frac{R_1 R_2 (T_1 - T_2)}{R_1 T_1 - R_2 T_2} \right)^2. \quad (4)$$

При достижении в момент времени τ_x в точке R_2 избыточной температуры $T_{2зад}(R_2, \tau_x) = mT_2(R_2, \tau_1)$ значение этой температуры будет определяться следующей зависимостью

$$T_{2зад}(R_2, \tau_x) = \frac{kq_{и.т} - q_{кл2}}{4\pi\lambda R_2} \left(1 - \frac{R_2}{\sqrt{\pi a \tau_x}} \right). \quad (5)$$

При изменении избыточной температуры в точке R_1 в m раз время эксперимента изменяется в $n = \frac{\tau_x}{\tau_1}$ раз.

Проанализируем, как изменяются тепловые потери, возникающие с поверхности образца, при изменении времени эксперимента в n раз. Из выражений (2) и (5) видно, что потери, обусловленные поглощением части энергии лазерного луча окружающей средой, а также частичным отражением лазерного луча от поверхности исследуемого объекта (коэффициент k), не зависят от времени, в отличие от потерь $q_{кл}$, вызванных конвективным и лучистым теплообменом с поверхности тела. Изменение потерь $q_{кл}$ обусловлено изменением площади нагретой зоны S , а также удельных тепловых потоков конвективного $\bar{q}_к$ и лучистого $\bar{q}_л$ теплообмена в зависимости от времени [3].

Рассмотрим, как изменяется с течением времени площадь нагретой зоны S . Граница температурного поля на поверхности исследуемого тела представляет собой изотерму в виде окружности, радиус $R_{гр}$ которой определяется по следующему выражению [1]

$$R_{гр} = 3,2\sqrt{4a\tau}. \quad (6)$$

Таким образом, площадь нагретой зоны можно рассчитать по следующей формуле

$$S = \pi R_{гр}^2 = \pi(3,2\sqrt{4a\tau})^2 \approx 40\pi a\tau. \quad (7)$$

Из выражения (7) видно, что при увеличении времени τ в n раз площадь нагретой зоны S также увеличивается в n раз.

Проведенные исследования показали [1], что для большинства строительных материалов при изменении избыточной температуры поверхности тела в $m = 1,05 \dots 1,15$ раз время изменяется также в m раз (то есть $m \approx n$). И при увеличении времени в n раз удельный поток конвективного теплообмена $\bar{q}_к$ практически не изменяется (в $n^{1/3}$), а удельный тепловой поток лучистого теплообмена $\bar{q}_л$ изменяется в n^3 раз, но его значение на два порядка меньше $\bar{q}_к$ [1], поэтому им можно пренебречь.

Таким образом, при увеличении времени τ эксперимента в n раз потери тепловой мощности за счет конвективного и лучистого теплообмена $q_{кл}$ увеличиваются так же, как и площадь нагретой зоны, в $n = \frac{\tau_x}{\tau_1}$ раз. С учетом этого выражение (5) можно записать в следующем виде

$$T_{2зад}(R_2, \tau_x) = m T_2(R_2, \tau_1) = \frac{k q_{и.т} - \frac{\tau_x}{\tau_1} q_{кл1}}{4\pi\lambda R_2} \left(1 - \frac{R_2}{\sqrt{\pi a \tau_x}} \right). \quad (8)$$

После математических преобразований выражений (2) и (8) получим формулу для расчета теплопроводности в следующем виде

$$\lambda = \frac{k q_{и.т} \left(\frac{\tau_x}{\tau_1} - 1 \right)}{4\pi R_2 \left(\frac{\frac{\tau_x}{\tau_1} T_2}{\left(1 - \frac{R_2}{\sqrt{\pi a \tau_1}} \right)} - \frac{T_{2зад}}{\left(1 - \frac{R_2}{\sqrt{\pi a \tau_x}} \right)} \right)}. \quad (9)$$

Коэффициент k определяется по предложенной ранее методике [2] следующим выражением

$$k = \frac{f(T)}{f(T_c)}, \quad (10)$$

где $f(T)$ – функция, определяемая конкретным типом используемого термодатчика; T – температура на поверхности исследуемого объекта, измеренная термодатчиком; T_c – температура окружающей среды, измеренная высокоточным электронным термометром.

Таким образом, определив коэффициент k , значения избыточных температур T_1, T_2 , моменты времени τ_1 и τ_x , зная мощность источника тепла, по формулам (4) и (9) можно определить искомые ТФС первого наружного слоя исследуемой трехслойной строительной конструкции.

Для определения ТФС второго наружного слоя исследуемой трехслойной строительной конструкции измерительный зонд (источник тепла и термодатчик)

ники) фокусируют на поверхность второго наружного слоя изделия и производят вышеописанные процедуры измерения.

ТФС внутреннего слоя строительной конструкции определяются контактным методом с использованием квазистационарного теплового режима. Для этого на каждую из наружных поверхностей строительной конструкции (рис. 2) устанавливают по одному зонду, в плоскости контакта первого из которых расположен дисковый нагреватель (ДН), а также термопара Тп1, помещенная в центр контактной плоскости дискового нагревателя. В плоскости контакта второго термозонда расположен датчик теплового потока Tq , а в центре круга датчика теплового потока вмонтирована вторая термопара Тп2.

Нагреватель и термопары как первого, так и второго зондов закрыты по внешней от контактной плоскости стороне теплоизоляционным материалом типа рипора или асбеста, что обеспечивает направленное движение тепловых потоков на наружную поверхность конструкции и препятствует теплообмену в других направлениях, тем самым реализовывая адиабатический режим нагрева.

Для определения ТФС материалов внутреннего слоя конструкции включают 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_{x3} , а также температуру в плоскостях 1 и 4 (см. рис. 2) с помощью термопар Тп1 и Тп2.

Перепад температур на первом слое конструкции в соответствии с [4] определяется как

$$\Delta T = T_1 - T_2 = Q_{x3} \frac{R_1}{\lambda_1}. \quad (11)$$

Отсюда температура в плоскости 2 (см. рис. 2) определяется из соотношения

$$T_2 = T_1 - Q_{x3} \frac{R_1}{\lambda_1}. \quad (12)$$

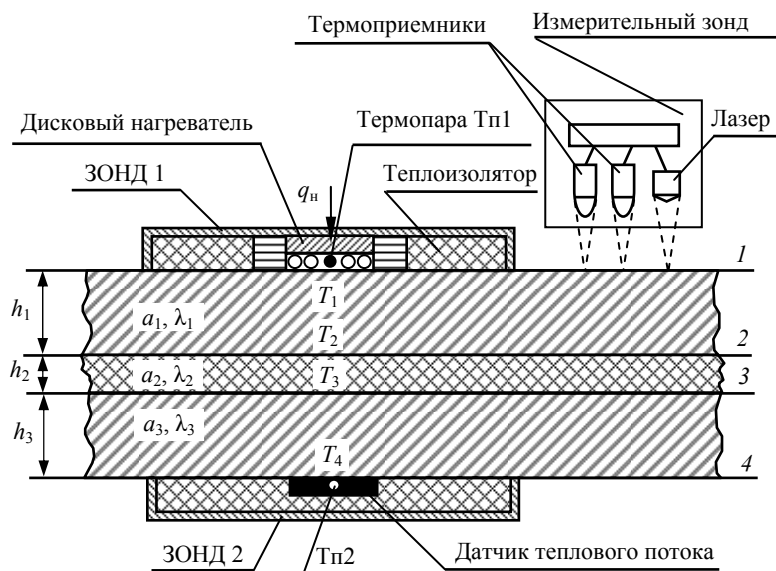


Рис. 2. Схема расположения источников и термодатчиков в методе НК ТФС трехслойных строительных конструкций

По аналогии с (12) температура в плоскости 3 (см. рис. 2) определяется из соотношения

$$T_3 = T_4 + Q_{x3} \frac{R_3}{\lambda_3}. \quad (13)$$

Используя выражения (12) и (13), определим перепад температуры на внутреннем слое конструкции

$$T_2 - T_3 = Q_{x3} \frac{R_2}{\lambda_2}. \quad (14)$$

Из выражения (14) искомый коэффициент теплопроводности внутреннего слоя конструкции определяется по соотношению

$$\lambda_2 = \frac{Q_{x3} R_2}{T_2 - T_3} = \frac{Q_{x3} R_2}{\left(T_1 - Q_{x3} \frac{R_1}{\lambda_1}\right) \left(T_4 - Q_{x3} \frac{R_3}{\lambda_3}\right)}. \quad (15)$$

Для определения коэффициента температуропроводности внутреннего слоя конструкции применяем аналитическое решение [5], описывающее распределение температуры по толщине R_2 слоя материала и во времени τ с использованием модели полупространства

$$T_2 - T_3 = \Delta T(R_2, \tau) = \frac{2q_x}{\lambda} \sqrt{a_2 \tau} \operatorname{ierfc} \left(\frac{R_2}{2\sqrt{a_2 \tau}} \right). \quad (16)$$

Имея информацию о λ и Q_{x3} и используя известные подробные таблицы для определения функции кратного интеграла вероятности $\operatorname{ierfc} z$, численным методом из выражения (16) легко определить искомый коэффициент температуропроводности a_2 .

Таким образом, имея информацию о мощности и частоте тепловых импульсов точечного линейного источника тепла (лазера) и измерив температуру в заданных точках поверхности исследуемого изделия, по соотношениям (4) и (9) определяем ТФС наружных слоев строительной 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 (15) и (16) определяют ТФС внутреннего слоя строительной конструкции.

Для проверки работоспособности разработанного метода были проведены эксперименты на трехслойном изделии, наружные слои которого выполнены из керамзитобетона, а внутренний – из пенопласта. Результаты ряда экспериментов приведены в табл. 1.

Проведенные экспериментальные исследования разработанного метода подтвердили корректность основных теоретических выводов, положенных в основу его создания, а также эффективность его практического применения в области теплофизических измерений.

Основным преимуществом разработанного метода, по сравнению с известными, является повышение оперативности контроля трехслойных изделий за счет использования комбинации контактного и бесконтактного тепловых воздействий на исследуемый объект. Оперативность контроля обусловлена тем, что при определении ТФС наружных слоев трехслойного изделия используется бесконтактный метод измерения параметров теплофизического эксперимента [1]. В нем используются неподвижно закрепленные источник излучения и термоприемники. Это позволяет устранить погрешности, присущие методам с подвижной измерительной головкой, и в большей степени уменьшить влияние тепловых потерь в окру-

Таблица 1

Результаты экспериментов на трехслойном изделии

	Экспериментальные данные		$\delta\lambda, \%$	$\delta a, \%$
	$\lambda, \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$	$a \cdot 10^7, \text{м}^2/\text{с}$		
Наружный слой № 1	0,67	7,84	4,7	7,6
Наружный слой № 2	0,66	7,62	4,4	8,3
Внутренний слой	0,052	5,42	4,8	7,67

окружающую среду на результаты измерений искомых ТФС, что существенно повышает метрологический уровень разработанного метода. Отсутствие высокоточных механически подвижных узлов позволяет значительно уменьшить стоимость устройства, реализующего предложенный метод.

Существенным преимуществом разработанного метода НК ТФС трехслойных изделий является использование адаптивных процедур при оптимизации энергетических параметров теплофизического эксперимента, что, во-первых, включает возможность разрушения исследуемых объектов из-за нагрева их до температур плавления, горения и т.д., во-вторых, повышает точность и достоверность искомых ТФС.

Использование предложенного метода в строительстве позволяет быстро и с достаточной точностью определять соответствие нормативным документам теплозащитных свойств многослойных конструкций и изделий как в процессе их создания, так и в процессе их эксплуатации.

Список литературы

1. Патент 2251098 Российская Федерация, МПК G 01 N 25/18. Способ бесконтактного неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов / Сысоев Э.В., Чернышов В.Н., Попов Р.В. ; заявитель и патентообладатель Тамб. гос. техн. ун-т. – № 2003133331/28 ; заявл. 17.11.2003 ; опубл. 27.04.2005, Бюл. № 12. – 11 с.
2. Неразрушающий контроль теплозащитных свойств многослойных строительных изделий / А.В. Чернышов [и др.]. – М. : Машиностроение-1, 2007. – 112 с.
3. Лыков, А.В. Теория тепло- и массопереноса / А.В. Лыков, Ю.А. Михайлов. – М. : Госэнергоиздат, 1963. – 535 с.
4. Дульнев, Г.Н. Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре / Г.Н. Дульнев. – М. : Высшая школа, 1984. – 247 с.
5. Козлов, В.П. Двумерные осесимметричные нестационарные задачи теплопроводности / В.П. Козлов ; под ред. А.Г. Шашкова. – Минск : Наука и техника, 1986. – 392 с.

Method of Non-Destructive Control over Thermo-Physical Properties of Multi-Layer Construction Items

V.N. Chernyshov, E.V. Sysoev, A.V. Chernyshov

Department "Criminal Law and Computerization of Legal Activity", TSTU

Key words and phrases: heat losses; non-destructive control; point source of heat; thermo-physical properties.

Abstract: The new method of non-destructive control over thermo-physical properties of three-layer construction structures and items is proposed; it enables to make quick and accurate measurements owing to application of combined approach.

Methode der nicht zerstörenden Kontrolle der wärmephysikalischen Eigenschaften der vielschichtigen Bauerzeugnisse

Zusammenfassung: Es ist die neue Methode der nicht zerstörenden Kontrolle der wärmephysikalischen Eigenschaften der dreischichtigen Baukonstruktionen und der Erzeugnisse vorgeschlagen. Diese Methode unterscheidet sich von der hohen Wendigkeit und der Genauigkeit der Messungen infolge der Nutzung des kombinierten Herangehens.

Méthode du contrôle non-destructif des propriétés thermophysiques des produits de construction multicouches

Résumé: Est proposée une méthode du contrôle non-destructif des propriétés thermophysiques des constructions de bâtiment et des produits à trois couches se distinguant par une haute efficacité et par la précision des mesures compte tenu de l'utilisation de l'approche combinée.
