

ЭКСПРЕСС-МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ И ТЕПЛООВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

А.В. Шарков, доктор технических наук, профессор;

В.А. Кораблёв, кандидат технических наук, доцент.

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики.

А.С. Некрасов.

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России

Целью исследования, описываемого в статье, является получение быстрого метода определения теплопроводности и теплового сопротивления ограждающих конструкций. Исследование включает в себя анализ дифференциального уравнения теплопроводности при граничных условиях первого рода и описание технического решения для реализации метода.

Ключевые слова: тепловой поток, теплопроводность, тепловое сопротивление, ограждающая конструкция, измерение теплового потока, измерение теплопроводности, измерение теплового сопротивления

METHOD OF RAPID EVALUATION THERMAL CONDUCTIVITY AND THERMAL RESISTANCE

A.V. Sharkov; V.A. Korablev. Saint-Petersburg national research university of information technologies, mechanics and optics.

A.S. Nekrasov. Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia

The aim of investigation the paper below deals with is obtaining of the rapid method of evaluation thermal conductivity and thermal resistance of shielding constructions. The investigation includes analysis of a Dirichlet problem for the differential equation of thermal conductivity and prescribing the technical solution for the method implementation.

Keywords: thermal flux, thermal conductivity, thermal resistance, shielding, heat flux measurement, thermal conductivity measurement, thermal resistance measurement

Одной из важнейших функций здания является тепловая защита от внешней среды или от пожара, в случае возникновения последнего. Значимым для этих функций физическим параметром материалов, из которых сделаны ограждающие конструкции, является их теплопроводность. От нее, например, частично зависит количество энергии, затраченное на обогрев зимой или предел огнестойкости конструкции. Теплопроводность ограждающих конструкций не всегда известна и, например, для проведения энергоаудита здания ее приходится измерять.

Согласно ГОСТу 26254–84, продолжительность измерений в натуральных условиях эксплуатации должна составлять не менее 15 сут. Данное требование обосновано необходимостью обеспечения внутри ограждающей конструкции стационарного температурного поля. Естественно, что такие длительные эксперименты весьма трудозатратны.

Методы определения теплопроводности и теплового сопротивления строительных материалов

Теплопроводность определяет интенсивность пространственного переноса теплоты в непрозрачных телах с неоднородными температурными полями. Количественную связь

между пространственными тепловыми потоками и температурным полем внутри тел определяет закон Фурье. Теплопроводность материала выступает в нем как коэффициент пропорциональности между удельным тепловым потоком и градиентом температуры в произвольном изотермическом сечении тела. Поэтому для экспериментального определения теплопроводности материалов в исследуемом образце приходится создавать неоднородное температурное поле [1].

Согласно закону Фурье, для экспериментального определения теплопроводности материала достаточно выбрать удобный для измерений участок в изотермическом сечении исследуемого тела и измерить в опыте три параметра: градиент температурного поля на выбранном участке, его температуру и плотность проникающего через него теплового потока. Следует лишь позаботиться о том, чтобы измерения были произведены одновременно и полученный результат отнесен к температуре слоя в данный момент.

Эта задача оказывается далеко не такой простой, какой кажется сначала. Во-первых, в распоряжении экспериментаторов отсутствуют средства прямого измерения температурных градиентов в произвольном сечении образца. Непосредственно измерять удастся только температурные перепады в слое конечной толщины. Во-вторых, температурные датчики и тепломеры, являясь инородными телами заметных размеров, в общем случае всегда деформируют температурное поле образца. Чтобы устранить или хотя бы существенно ослабить искажающее влияние указанных факторов, приходится создавать тепловую ячейку и использовать для измерений образцы определенной формы.

Ячейка предназначена для создания в образце удобного для измерений неоднородного одномерного стационарного температурного поля с четко фиксированными изотермическими рабочими гранями. Этому требованию в полной мере могут удовлетворять лишь однородные образцы простейшей формы (пластина, полый цилиндр и полый шар). Неоднородность полей нужна для создания в образце пространственного переноса теплоты. Стационарность полей устраняет их зависимость от теплоемкости и теплопроводности исследуемого материала.

При теплофизических измерениях самыми удобными формами образца являются диск, пластина квадратного сечения или стержень постоянного сечения, в которых с помощью тепловой ячейки принудительно создается плоское одномерное температурное поле. К их плоским рабочим граням в ячейке плотно прижимаются металлические (изотермические) пластины с вмонтированными в них температурными датчиками и тепломерами. У таких образцов остается открытая боковая грань с неоднородным температурным полем, которую приходится защищать от теплообмена с внешней изотермической средой. Боковой теплообмен нежелателен по следующим причинам: он искажает одномерность плоского температурного поля в образце и при расчете теплопроводности нуждается в громоздком количественном учете. В данной работе особый интерес представляет пластина, поэтому описаны будут методы с использованием образцов именно этого вида [2].

Стационарные методы измерения теплопроводности стали разрабатываться вскоре после основополагающих исследований Фурье по аналитической теории теплоты. Некоторые из указанных методов давно считаются классическими, а созданные на их основе приборы и сейчас используются в метрологических центрах разных стран в качестве рабочих эталонов теплопроводности.

Для исследования теплоизоляторов часто используют стационарные методы, где исследуемым образцам придают форму пластин. Несколько реже в качестве образцов используются цилиндрические и сферические слои.

Плоские образцы обычно выполняются в виде дисков толщиной h с квадратным или круглым поперечным сечением S . У образцов рабочими являются плоские грани. В опыте через них проникает заданный постоянный тепловой поток Q , благодаря чему в образце между плоскими гранями возникает температурный перепад Δt . Принимаются меры, устраняющие теплообмен боковой поверхности образца с внешней средой, поэтому температурное поле, возникающее в стационарном режиме между плоскими гранями

образца, оказывается плоским одномерным. При достаточно малых значениях перепада Δt это поле (как следует из закона Фурье при $\lambda = \text{const}$) можно считать линейным. В итоге исходной расчетной формулой для искомой теплопроводности становится простое соотношение:

$$\lambda = \frac{Qh}{S\Delta t}.$$

В каждой конкретной тепловой ячейке исходная расчетная формула обычно дополняется поправочными членами, учитывающими влияние нежелательных тепловых потерь и контактных тепловых сопротивлений [2].

Все стационарные методы измерения теплопроводности различаются способами задания и регистрации теплового потока Q , проникающего через образец, а также приемами устранения нежелательных потоков, в том числе через боковые грани образца.

Основным недостатком стационарных методов является длительность эксперимента. Для достижения стационарного режима иногда необходимо несколько часов. В методах с поправкой на нестационарность время эксперимента значительно ниже, но появляется необходимость знать дополнительные свойства образца, например, теплоемкость.

Наиболее известными стационарными методами являются:

- метод одной пластины с охранным кольцом;
- метод двух пластин (дисков) с охранным кольцом;
- метод одной пластины без охранный кольца;
- сравнительный метод двух пластинок;
- метод пластины с поправкой на нестационарность.

К нестационарным методам измерения теплопроводности относятся, прежде всего, методы регулярного режима.

Несмотря на простое теоретическое описание, стационарные методы довольно сложно реализуются. В частности, создание стабильного стационарного температурного поля внутри образца является трудной технической задачей. Также к минусам стационарных методов можно отнести длительность эксперимента. Время установления стационарного температурного поля может достигать нескольких часов, а иногда и суток.

Нестационарные методы проще реализовать, но они требуют знания дополнительных параметров образцов, таких как, например, теплоемкость и плотность. Также к недостаткам можно отнести тот факт, что некоторые методы затруднительно применять в натуральных условиях.

Исходя из вышеперечисленных недостатков существующих методов, можно сделать вывод о том, что необходимо разработать метод, позволяющий в короткие сроки определять теплопроводность, опираясь на измерения температуры и тепловых потоков.

Процессы нестационарной теплопроводности в плоской стенке.

Уравнение теплопроводности и краевые условия

Рассмотренная ниже задача является одной из основных классических задач. В граничных условиях первого рода задается температура поверхности тела (в данном случае неограниченная пластина) как функция времени τ . Рассмотрим простейший случай, когда температура поверхности тела остается неизменной на протяжении всего процесса теплообмена.

Под неограниченной пластиной обычно понимают такую пластину, ширина и длина которой бесконечно велики по сравнению с толщиной. Таким образом, неограниченная пластина представляет собой тело, ограниченное двумя параллельными плоскостями. Изменение температуры происходит только в одном направлении x , в двух других направлениях y и z температура неизменна:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \right).$$

Следовательно, задача является одномерной [3].

Постановка задачи

Дано начальное распределение температуры по толщине h пластины в виде некоторой функции $t(x,0)$, условно примем, что распределение равномерное и равно нулю: $t(x,0)=t_0=0$. В начальный момент времени $\tau=0$, температура одной из ограничивающих поверхностей (например, грань с $x=h$) мгновенно изменяется на величину t_n и сохраняется постоянной, а температура другой грани ($x=0$) принудительно поддерживается на начальном уровне $t(0,\tau)=t_0=0$. Необходимо найти распределение температуры по толщине пластины и расход тепла в любой момент времени (рис. 1).

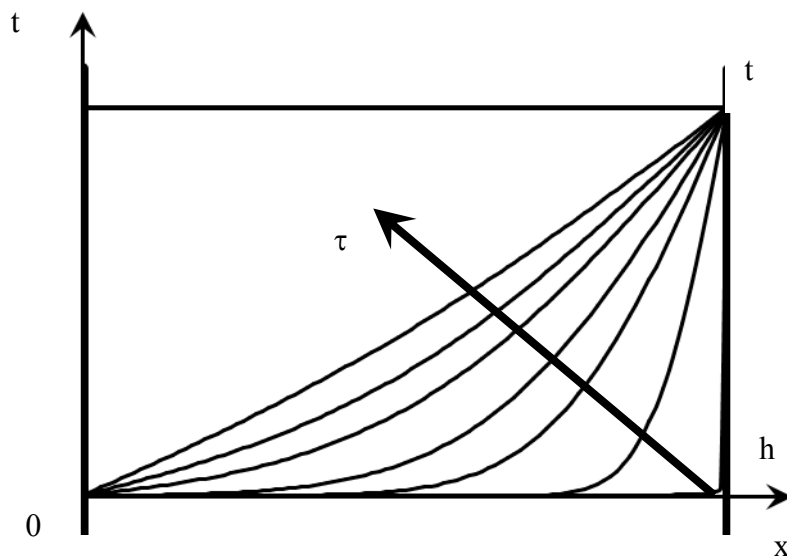


Рис. 1. Пластина с разными изотермическими воздействиями на ее грани

Условие задачи математически может быть сформулировано следующим образом. Имеем дифференциальное уравнение [3]:

$$\frac{\partial t(x, \tau)}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t(x, \tau)}{\partial x^2}, (\tau > 0; 0 < x < h),$$

при условиях:

$$\left. \begin{aligned} t(x, 0) &= t_0 = 0, \\ t(0, \tau) &= t_0 = 0, \\ t(h, \tau) &= t_n = \text{const.} \end{aligned} \right\}$$

Решение уравнения теплопроводности

Уравнение теплопроводности можно решить различными способами. Например, методом разделения переменных, операционным методом или численным. Воспользуемся решением из учебного пособия [2].

Общее решение задачи удастся представить двумя равнозначными выражениями:

$$t(x, \tau) = t_n \left(\frac{\operatorname{erfc}(h-x)}{2\sqrt{\alpha\tau}} - \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{\operatorname{erfc}((2n+1)(h-x))}{2\sqrt{\alpha\tau}} - \frac{\operatorname{erfc}((2n-1)(h+x))}{2\sqrt{\alpha\tau}} \right) \right). \quad (1)$$

$$t(x, \tau) = t_n \left(\frac{x}{h} - \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{2}{n\pi} \sin\left(\frac{n\pi x}{h}\right) \exp(-n^2\pi^2 Fo) \right). \quad (2)$$

Первое решение (1) удобно использовать в области малых значений критерия $Fo = \delta\tau h^2$, а второе (2) – при больших значениях критерия ($Fo > 0,06$).

На начальной стадии (при малых Fo) суммой ряда в выражении (1) можно пренебречь. Выражение для $t(x, \tau)$ упрощается до вида:

$$t(x, \tau) = t_n \operatorname{erfc}\left(\frac{h-x}{2\sqrt{\alpha\tau}}\right),$$

а поле удельных тепловых потоков $q(x, \tau)$, пронизывающих пластину, определяется функцией вида:

$$q(x, \tau) = -\frac{t_n \lambda}{\sqrt{\pi\alpha\tau}} \exp\left(-\frac{(h-x)^2}{4\alpha\tau}\right),$$

поэтому на начальной стадии через ее грани проникают потоки:

$$q(0, \tau) = -\frac{t_n \lambda}{\sqrt{\pi\alpha\tau}} \exp\left(-\frac{h^2}{4\alpha\tau}\right) \approx 0, \quad q(h, \tau) = -\frac{t_n \lambda}{\sqrt{\pi\alpha\tau}}. \quad (3)$$

На более поздних стадиях поле удельных тепловых потоков в пластине, согласно (2), должно подчиняться зависимости:

$$q(x, \tau) = t_n \frac{\lambda}{h} \left(1 - 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \cos\left(\frac{n\pi x}{h}\right) \exp(-n^2\pi^2 Fo) \right),$$

поэтому через ее грани проникают удельные потоки:

$$q(0, \tau) = t_n \frac{\lambda}{h} \Phi_0(Fo), \quad q(h, \tau) = t_n \frac{\lambda}{h} \Phi_h(Fo),$$

где в рассмотрение введены универсальные однопараметрические функции, в которых аргументом является критерий Фурье [2]:

$$\Phi_0(Fo) = \left(1 - 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \exp(-n^2\pi^2 Fo) \right),$$

$$\Phi_h(Fo) = \left(1 - 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \cos(n\pi) \exp(-n^2\pi^2 Fo) \right).$$

Анализ результатов решения

Графики тепловых потоков $q(x, \tau)$, пронизывающих пластину, на основании (3) будут иметь следующий вид (рис. 2).

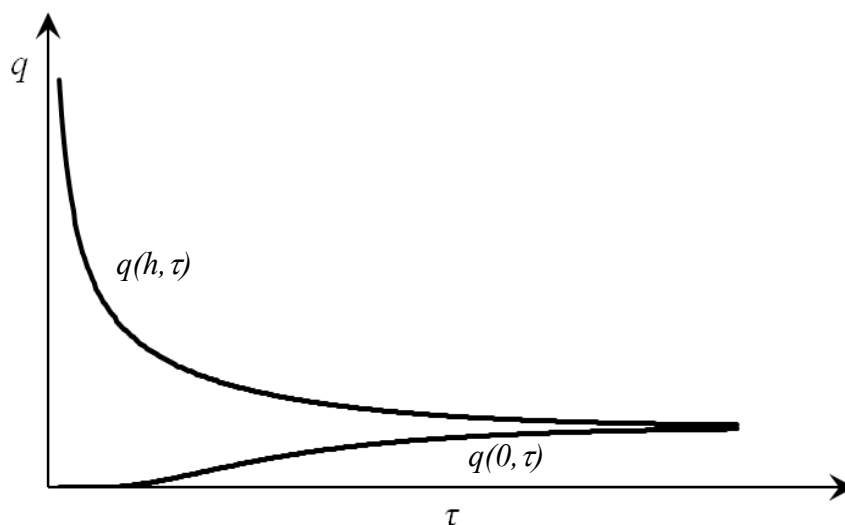


Рис. 2. Тепловые потоки, пронизывающие пластину

Как можно заметить, потоки на обеих поверхностях пластины стремятся сравняться. Момент, когда потоки на обеих поверхностях пластины сравняются, является моментом начала стационарного теплового режима. Однако в некоторых случаях время наступления стационарного режима может достигать нескольких часов, а иногда и суток, в зависимости от материала и толщины пластины.

Особый интерес в данной работе представляет величина $0,5(q(0, \tau) + q(h, \tau))$, график которой представлен на рис. 3.

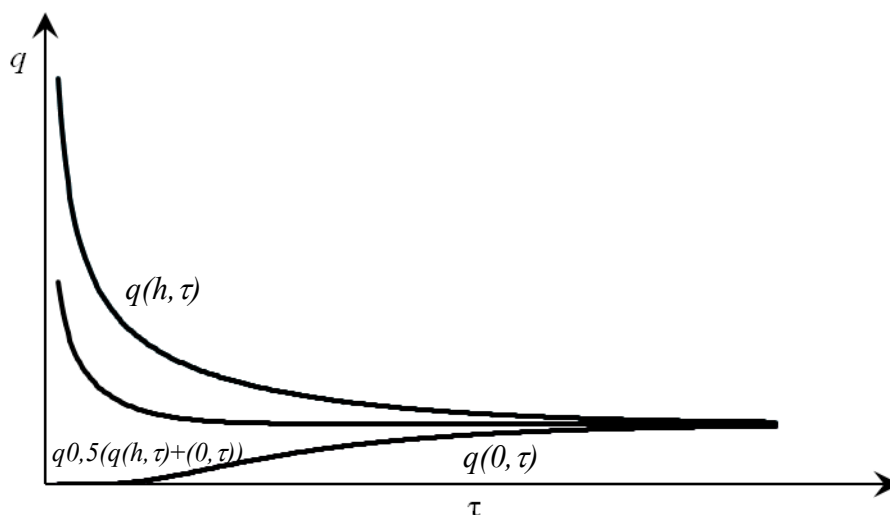


Рис. 3. Тепловые потоки, пронизывающие пластину, и их полусумма

Как видно из графика, величина $0,5(q(0, \tau) + q(h, \tau))$ становится постоянной намного раньше $q(0, \tau)$ и $q(h, \tau)$.

Рассчитав значения функций $q(0, \tau)$, $q(h, \tau)$ и $0,5(q(0, \tau) + q(h, \tau))$ при единичных параметрах $h, \lambda, a, t_{п}$ с помощью программного пакета MathCad, можно обратить внимание, что значение $0,5(q(0, \tau) + q(h, \tau))$ становится равным стационарному потоку с погрешностью менее 5 % при значении критерия $Fo = a\tau/h^2 > 0,1$, где a – температуропроводность стенки.

Способ измерения теплопроводности строительной конструкции

На основании теоретических расчетов, изложенных выше, экспериментальных данных и анализе патентов и ГОСТов, составлена заявка на получение патента на изобретение, по которой вынесено положительное решение о выдаче патента.

Согласно ГОСТу 26254–84 «Методы определения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций», температуры и плотности тепловых потоков измеряют после достижения в испытываемой ограждающей конструкции стационарного или близкого к нему режима. Продолжительность измерений в натуральных условиях эксплуатации должна составлять не менее 15 сут. После установления стационарного режима расчет искомых параметров производится по формуле:

$$\lambda = \frac{q \cdot l}{(T_1 - T_2)} \text{ и } R = \frac{(T_1 - T_2)}{q},$$

где T_1 и T_2 – температуры поверхностей; q плотность теплового потока; l – теплопроводность; R – тепловое сопротивление ограждающей конструкции.

В качестве прототипа в заявке на патент была выбрана установка, описанная в патенте РФ № 2323435 «Способ теплового неразрушающего контроля сопротивления теплопередаче строительных конструкций». В патенте описывается способ определения сопротивления теплопередаче с использованием двух теплоизолированных нагревательных элементов. Этот способ является ближайшим к заявленному. Согласно описанному способу теплового неразрушающего контроля сопротивления теплопередаче строительных конструкций, включающем установку на одной стороне конструкции первого теплоизолированного плоского нагревательного элемента, реализующего нагрев контролируемой конструкции, осуществляемое через заданный интервал времени измерение теплового потока, проходящего через строительную конструкцию, а также температур на обеих поверхностях строительной конструкции, определение сопротивления теплопередаче строительной конструкции по формуле:

$$R_0 = (T_B - T_H) / q,$$

где R_0 – сопротивление теплопередаче строительной конструкции; T_B , T_H – температура на внутренней и наружной поверхностях строительной конструкции соответственно; q – тепловой поток через строительную конструкцию, после установки первого теплоизолированного плоского нагревательного элемента на противоположной стороне строительной конструкции напротив первого нагревательного элемента дополнительно устанавливаются второй теплоизолированный плоский нагревательный элемент, реализующий нагрев контролируемой конструкции с температурой, отличной от температуры первого плоского нагревательного элемента, термостабилизируют оба нагревательных элемента, при этом линейные размеры нагревательных элементов выбирают в диапазоне от трех до пяти размеров толщины строительной конструкции, измеренной в средней части нагревательных элементов.

Недостаток известного способа состоит в том, что формула (4) применима только для условий стационарного процесса теплопередачи через исследуемый объект. Процесс теплопередачи через строительную конструкцию переходит в стационарный ориентировочно через 3–4 сут. при выполнении следующего условия: температура на обеих поверхностях (наружной и внутренней) строительной конструкции не должна изменяться, что обеспечивается двумя теплоизолированными нагревателями.

Для обеспечения достоверного определения термического сопротивления строительной конструкции необходимо обеспечить стабильные температуры на наружной и внутренней поверхностях в течение 3–4 сут. Выдержка в течение такого длительного времени и, таким образом, значительные сроки проведения работ по оценке состояния строительных конструкций влияют на стоимость работ и отдалают получение достоверных результатов. Важность получения информации о состоянии сооружений в настоящее время не вызывает сомнений.

Таким образом, существует потребность в разработке способа теплового неразрушающего контроля сопротивления теплопередаче строительных конструкций, который бы устранял недостатки аналогов, известных на настоящий момент из уровня техники.

Технический результат, который достигается при использовании описанного способа, состоит в сокращении времени проведения испытаний.

Указанный технический результат достигается за счет того, что в способе измерения теплопроводности и теплового сопротивления строительной конструкции толщиной h , включающем установку на обеих сторонах конструкции плоских термостатирующих элементов и на одной стороне тепломера, отличающимся тем, что кроме первого тепломера на противоположной поверхности конструкции устанавливается второй тепломер, затем, после включения термостатирующих элементов через время τ , определяемое по зависимости $\tau=4 \cdot 10^5 \cdot h^2$, где h – толщина образца, измеряют температуры поверхностей T_1 и T_2 , плотности тепловых потоков q_1 и q_2 и рассчитывается теплопроводность λ материала конструкции по формуле:

$$\lambda = \frac{[(q_1 + q_2) \cdot h]}{2 \cdot (T_1 - T_2)},$$

а тепловое сопротивление R по формуле:

$$R = \frac{2 \cdot (T_1 - T_2)}{q_1 + q_2}.$$

Зависимость $\tau=4 \cdot 10^5 \cdot h^2$ составлена на основании анализа температуропроводностей строительных материалов (табл. 1) [3, 4].

Строительные материалы	λ , Вт/м·К	c , Дж/кг·К	ρ , кг/м ³	$a \cdot 10^{-7}$, м ² /с
Кирпич	0,5–0,8	840–1000	1200–1800	2,7–7,9
Пенобетон	0,14–0,37	1000	100	14–37
Дерево	0,15	170	500	17
Минирал. вата	0,07–0,08	800	125–200	4,37–8
Пенополистирол	0,04	1450	15–50	5,5–18,3
Бетон	1,3	880	2500	5,9

Как видно из таблицы, температуропроводность строительных материалов не отличается больше, чем на порядок. Отсюда можно сделать вывод, что время, достаточное для установления постоянной полусуммы потоков на поверхностях ограждающей конструкции, будет не меньше, чем при измерении ограждающей конструкции из материала с наименьшей температуропроводностью (то есть кирпич). Таким образом, из вычисленного ранее значения критерия $Fo=0,1$, минимальной температуропроводности $a=2,7 \cdot 10^{-7}$ м²/с получаем время, необходимое для начала измерений:

$$\tau = Fo \cdot h^2 / a = 0.1 \cdot h^2 / 2,7 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2 / \text{с} = 4 \cdot 10^5 \cdot h^2.$$

Сущность изобретения и возможность достижения при его использовании указанного технического результата будет более понятна из последующего описания со ссылками на позиции чертежей, где на рис. 4 приведена принципиальная схема установки, с помощью которой реализуется описанный способ.

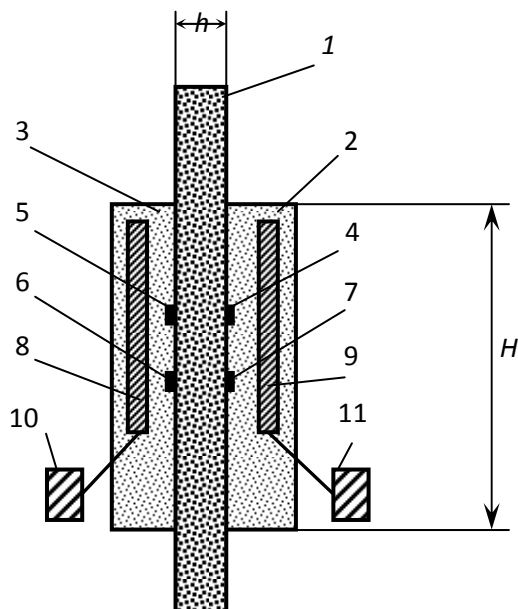


Рис. 4. Принципиальная схема установки

Предлагаемый способ теплового неразрушающего контроля заключается в следующем.

На строительную конструкцию 1 (например, стену здания) устанавливают два – первый 2 и второй 3 плоские теплоизолированные нагревательные элементы. Их монтируют на противоположных сторонах стены – наружной и внутренней. При этом линейные размеры нагревательных элементов 2, 3 составляют от трех до пяти величин толщины конструкции 1, измеренной в средней части установленных нагревательных элементов, например, по их оси. Причем первый нагревательный элемент 2 реализует нагрев конструкции до температуры, отличной от той, до которой нагревает соответствующую сторону конструкции 1 нагревательный элемент 3. С помощью исполнительных нагревательных узлов 8, 9 внутри элементов 2, 3 устанавливаются соответствующие температуры, например T_1 и T_2 , которые измеряются датчиками температуры 4 и 5, которые также установлены по разные стороны конструкции 1. Данные температуры стабилизируют посредством систем термостабилизации 10, 11 исполнительных нагревательных элементов в течение определенного времени τ от 1 сут.

Указанный интервал времени определяется перед проведением измерений и зависит от материалов и толщины h конструкции 1.

Системы термостабилизации 10, 11 исполнительных нагревательных элементов 8, 9 обеспечивают постоянную температуру внутри плоских нагревательных элементов и температуру нагрева строительной конструкции вне зависимости от температуры наружного воздуха и воздуха внутри помещения.

По истечении времени τ температуры поверхностей стены устанавливаются равными температурам теплоизолированных нагревательных элементов 2, 3. В этот момент времени датчиками теплового потока 6 и 7 измеряют тепловые потоки q_1 и q_2 через строительную конструкцию. Далее осуществляют определение теплопроводности λ материала конструкции и тепловое сопротивление R по вышеописанным формулам.

Для повышения достоверности результатов контроля путем минимизации величины теплового потока вдоль конструкции размеры теплоизолированных нагревательных элементов выбирают по результатам проведенных экспериментальных исследований в диапазоне от трех до пяти величин толщины строительной конструкции, измеренной в средней части установленных нагревательных элементов, например по их оси.

Описанный способ был успешно опробован на нескольких образцах строительных конструкций и подтвердил свою эффективность.

Литература

1. Крейт Ф., Блэк У. Основы теплопередачи: пер. с англ. М.: Мир, 1983. 512 с.
2. Платунов Е.С., Баранов И.В., Буравой С.Е. Теплофизические измерения: учеб. пособие. СПб.: С.-Петербург. гос. ун-т низкотемп. и пищ. технол., 2010. 738 с.
3. Физические величины: справ. / А.П. Бабичев [и др.]; под. ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
4. Ильинский В.М. Строительная теплофизика (ограждающие конструкции и микроклимат зданий): учеб. пособие. М.: Высш. школа, 1974. 320 с.