



НОВЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕРМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ

О.Н.БУДАДИН

ООО «НПО «Институт термографии». 107076, г. Москва, ул. Матросская Тишина, 23/7, корп.1.

E-mail: instermograp@mail.ru

Для объективной оценки рационального использования энергоресурсов и обеспечения достоверных результатов энергетического аудита проведены следующие работы. Разработан объективный метод теплового (тепловизионного) контроля термического сопротивления многослойных строительных конструкций в реальных условиях их эксплуатации, позволяющий осуществлять обработку данных без решения обратных задач и практически без участия оператора. Оптимизированы режимы контроля по разработанной методике. Показано, что наименьшая погрешность результатов контроля достигается при регистрации температурных историй в интервале 2,5–4 сут. Проведена метрологическая аттестация методики контроля. Показано, что погрешность получаемых результатов (систематическая и случайная) не превышает 8,8 %. Разработан прибор «ИТС-03-ПОТОК», обеспечивающий в автономном режиме автоматическое измерение термического сопротивления светопрозрачных и нестепрозрачных ограждающих конструкций. Данный прибор сертифицирован как средство измерения. Библиогр. 4, табл. 2, рис. 9.

Ключевые слова: тепловой (тепловизионный) контроль, термическое сопротивление, сопротивление теплопередаче, инструментальный энергетический аудит

Одной из величин, определяющих энергоэффективность строительной конструкции (в том числе величину сверхнормативных потерь через ограждающие конструкции), а следовательно, определение которой входит в обязательном порядке в технологию энергетического аудита, является термическое сопротивление. Это определено рядом нормативных документов, например [1] и др.

Большинство проблем, возникающих при определении этой величины, заключались в том, что, как правило, методы ее определения «работают» в условиях стационарности процесса теплопередачи через ограждающую конструкцию, в то время как в действительности процесс являлся сугубо нестационарным. Это приводило к ограничению возможности определения сопротивления теплопередаче и к большой погрешности получаемых результатов.

Решение этой проблемы впервые было предложено в работе [2] и развито в работе [3]. Оно заключается в решении обратной задачи нестационарной теплопроводности в многослойной среде. Метод универсален и в настоящее время находит широкое применение на практике.

Однако его применение выявило и сдерживается рядом недостатков, которые заключаются в следующем:

- имеется существенная нелинейная зависимость точности получаемых результатов от погрешности входных данных – результатов первичных измерений. Это приводит к необходимости обеспечивать малые значения погрешности результатов первичных измерений, что требует применения специальных измерительных приборов, квалифицированных операторов и т.п. Помимо

этого, требуется соблюдение специальных климатических условий при проведении измерений;

- наличие ошибки входных данных может привести к случаю, когда обратная задача не сходится, т.е. будет отсутствовать решение;

- решением обратной задачи, как правило, является не само сопротивление теплопередаче, а величина теплопроводности одного из слоев, обычно слоя с наименьшим сопротивлением теплопередаче – теплоизоляционного слоя;

- для реализации контроля по методикам, использующим решение обратной задачи, необходимо априори знать состав и теплотехнические характеристики слоев контролируемой ограждающей конструкции (для получения теоретических температурных полей на основе математических моделей), что на практике не всегда выполнимо;

- в результате решения обратной задачи в силу специфических особенностей математического аппарата и физических принципов получаются кроме основного решения (глобального минимума функции «невязки») несколько локальных минимумов (ложных решений). Это приводит к необходимости выбора оператором нужного «истинного» решения на основе других дополнительных входных данных и др., что вносит субъективную (а значит, трудно учитываемую) погрешность;

- перед применением метода обратной задачи необходимо провести цикл трудоемких исследований корректности, единственности, сходимости и устойчивости решения;

- методики контроля имеют малую производительность контроля, так как априори неизвестно, какая протяженность временной истории обеспечивает необходимую достоверность. Поэтому при проведении контроля стараются по-



лучить максимально возможную протяженность временной истории, что приводит к увеличению производительности;

– трудно обеспечить повторяемость результатов вследствие существенного влияния на результаты входных данных и субъективной погрешности, что существенно затрудняет оценку достоверности результатов и метрологическую аттестацию методики контроля.

Кроме того, на достоверность результатов по существующим методикам большое влияние оказывает субъективный фактор: поскольку априори известны значения теплотехнических характеристик слоев обследуемой конструкции (из проектной документации), а следовательно, и проектное значение сопротивления теплопередаче, то существует «соблазн» для оператора слегка поправить расчетные результаты в сторону проектных значений, тем более, что процесс решения обратной задачи в силу некоторой специфики это позволяет.

Это снижает доверие к получаемым результатам.

Цель настоящей работы – создание новой технологии определения сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции, свободной от перечисленных выше недостатков, в том числе исключение решения обратной задачи и априорное знание теплотехнических характеристик слоев ограждающей конструкции.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

– разработан математический аппарат определения сопротивления теплопередаче в нестационарных условиях теплопередачи, основанный на методах математического анализа и математической статистики, без использования методов решения обратной задачи и априорных знаний состава ограждающей конструкции. Он сводится к решению системы уравнений относительно термического сопротивления:

$$\begin{aligned} \bar{q}_B(t) &= \frac{\bar{T}_B(t) - \bar{T}_H(t)}{R} + \Delta q_B(t), \\ \bar{q}_H(t) &= \frac{\bar{T}_B(t) - \bar{T}_H(t)}{R} + \Delta q_H(t), \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \Delta q_B(t) &= \alpha_B \left[\bar{T}_B(t) - \int_0^\infty k_{11}(\tau) \bar{T}_B(t - \tau) d\tau \right] + \\ &+ \frac{1}{R} \int_0^\infty k_{12}(\tau) \left[\bar{T}_B(t - \tau) - \bar{T}_B(t) - (\bar{T}_H(t - \tau) - \bar{T}_H(t)) \right] d\tau, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta q_H(t) &= \alpha_H \left[\bar{T}_H(t) - \int_0^\infty k_{11}(\tau) \bar{T}_H(t - \tau) d\tau \right] + \\ &+ \frac{1}{R} \int_0^\infty k_{12}(\tau) \left[\bar{T}_H(t - \tau) - \bar{T}_H(t) - (\bar{T}_B(t - \tau) - \bar{T}_B(t)) \right] d\tau, \end{aligned}$$

$$\int_0^\infty k_{ij}(\tau) d\tau = 1,$$

где $\bar{q}_B(t)$, $\bar{q}_H(t)$ – величина усредненного теплового потока на внутренней и наружной поверхностях конструкции; $\bar{T}_B(t)$, $\bar{T}_H(t)$ – величины усредненной температуры на внутренней и наружной поверхностях конструкции; R – величина термического сопротивления; $\Delta q_B(t)$, $\Delta q_H(t)$ – корректирующие величины теплового потока; α_B , α_H – коэффициент теплообмена на наружной и внутренней поверхностях конструкции; k_{ij} – весовые коэффициенты; τ – параметр интегрирования;

– проведены теоретические и экспериментальные исследования разработанной технологии и разработана методика проведения контроля;

– разработана методика метрологической аттестации технологии определения сопротивления теплопередаче в нестационарных условиях теплопередачи и проведена метрологическая аттестация методики контроля.

Методика определения сопротивления теплопередаче заключается в следующем.

1. Измеряются температурные истории и истории тепловых потоков в течение трех-четырех суток на наружных и внутренних поверхностях ограждающей конструкции.

2. Полученные значения вводятся в специальную программу обработки.

3. Программа запускается на выполнение, без вмешательства оператора проводится расчет и формируется результат – термическое сопротивление или сопротивление теплопередаче в реперной зоне. Далее осуществляется определение приведенного сопротивления теплопередаче по обследуемой поверхности по общеизвестным формулам.

В рамках математической модели использовался математический аппарат анализа формы объектов, который представляет собой одну из основных задач распознавания образов и имеет определенное значение для решения задач машинной графики в интерактивном режиме. Он необходим для определения границ реперной зоны с целью минимизации погрешности результатов контроля.

Анализ формы оказывается полезным во всех случаях, когда требуется принять некоторое решение на основе формы наблюдаемых объектов.

Использовали два подхода к распознаванию формы объектов: при первом рассматриваем объект в целом и принимаем решение, исходя из его общей структуры; при втором исследуется контур объекта: обычно определяются углы, выступы, впадины и другие точки с высокими значениями кривизны.

Дальнейший анализ контура проводится несколькими способами. Простейшая методология предусматривает получение несложного пред-



ставления контура, например, в цепном коде. При использовании более развитой методологии контур аппроксимируется участками гладких кривых (например, B-сплайнами). Последнее предпочтительно в тех случаях, когда данные зашумлены, а также при использовании признаков, отражающих особенности значительной части контура. Первый подход более уместен при работе с данными, отличающимися низким уровнем шума, и использовании локальных признаков. Широкое применение аппроксимации многоугольниками объясняется не только связанной с ней возможностью обнаруживать максимумы кривизны, но и тем, что её реализация оказывается проще реализации других методов построения кривых по точкам.

Отыскание кривой, проходящей через заданное множество точек, составляет задачу интерполирования, а отыскание кривой, проходящей вблизи заданного множества точек, – задачу аппроксимации. Разработан метод, предусматривающий использование кусочно-полиномиальных функций различных типов. При решении задач аппроксимации уделяется внимание выбору критерия, характеризующего качество приближения.

Для решения поставленной задачи разработан метод интерполирования с помощью многочленов.

Пусть $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$ – последовательность точек, заданных на плоскости, причём $x = x_i$ при $i = j$. Для этих точек можно записать интерполяционный многочлен $(n - 1)$ -й степени так:

$$P_n(x) = y_1 \frac{(x - x_2) \dots (x - x_n)}{(x_1 - x_2) \dots (x_1 - x_n)} + y_2 \frac{(x - x_1)(x - x_3) \dots (x - x_n)}{(x_2 - x_1)(x_2 - x_3) \dots (x_2 - x_n)} + \dots + y_n \frac{(x - x_1) \dots (x - x_{n-1})}{(x_n - x_1) \dots (x_n - x_{n-1})}, \quad (2)$$

или представить в более строгом виде:

$$P_n(x) = \sum_{i=1}^n y_i \prod_{j \neq i} \frac{(x - x_j)}{(x_i - x_j)}. \quad (3)$$

Из приведенного выражения следует, что значение y умножается на дробь, равную 1 при $x = x_i$ и 0 при остальных значениях x , принимаемых им в заданных координатах. Частному случаю $n=2$ соответствует уравнение линии, соединяющей две точки:

$$P_2(x) = y_1 \frac{x - x_2}{x_1 - x_2} + y_2 \frac{x - x_1}{x_2 - x_1}. \quad (4)$$

Отметим некоторые недостатки, присущие разработанному методу: существенные колебания, которые может претерпевать кривая, построенная между двумя точками. Однако достоинство метода – достаточно простые формулы – перекрывают недостатки.

На рис. 1 приведен интерфейс программы обработки данных для определения величины термического сопротивления в реперной зоне ограждающей конструкции.

Проведены теоретические исследования разработанной методики измерения термического сопротивления многослойной строительной конструкции.

Как известно, температура на поверхности земли изменяется в течение суток по периодическому закону. На рис. 2 приведен график изменения температуры за 7 дней.

В идеальном случае при отсутствии шумов эти изменения можно представить следующей формулой:

$$T(t) = T_0 + T_m \sin(2\pi t / T_{\text{сут}}), \quad (5)$$

где T_0 – постоянное среднее значение температуры; T_m – амплитуда колебания; t – текущее значение времени; $T_{\text{сут}}$ – период суток (24 ч).

В реальных условиях на поверхности земли на температуру влияет большое количество случайных шумов и помех (ветер, туман, облака и т.п.). Представив эти влияния как случайные воздей-



Рис. 1. Интерфейс программы обработки данных ограждающей конструкции

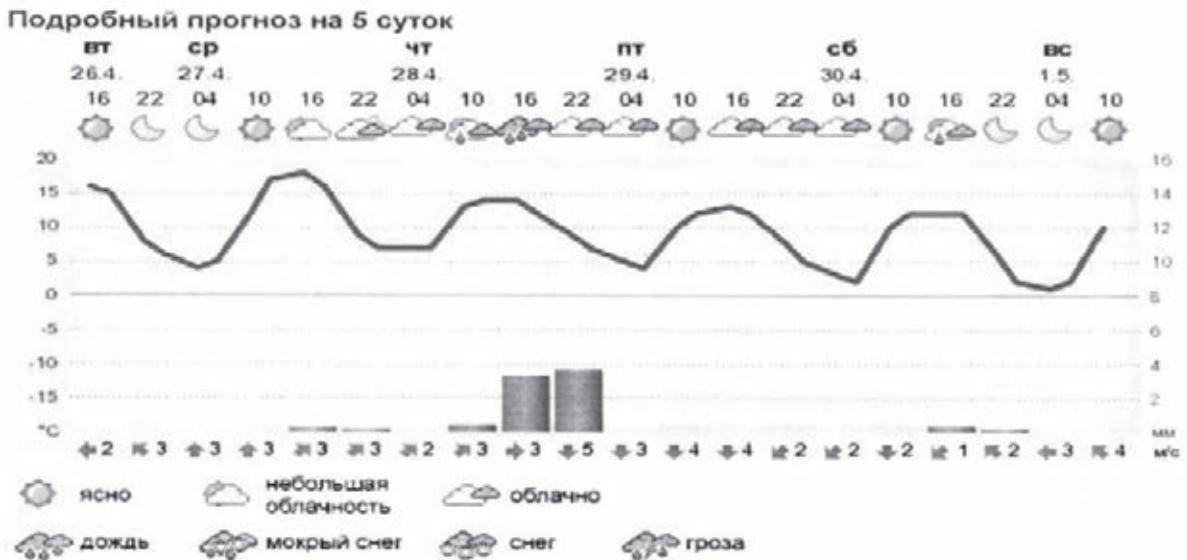


Рис. 2. Графики изменения температуры на поверхности земли за 7 дней

ствия, температуру на поверхности земли можно записать в виде:

$$T(t) = T_0 + T_m \sin(2\pi t/T_{\text{сут}}) + \sigma_T(x(t)). \quad (6)$$

Здесь $\sigma(x(t))$ – функция случайной величины, влияющая на температуру; x – параметр, определяемый доверительной вероятностью.

Аналогичный закон изменения может быть применен для описания величины теплового потока Q на поверхности конструкции на поверхности земли:

$$Q(t) = Q_0 + Q_m \sin(2\pi t/T_{\text{сут}}) + \sigma_Q(x(t)). \quad (7)$$

В качестве примера теоретических исследований приведен результат оптимизации времени проведения контроля из условия минимизации погрешности результатов контроля.

Для этого представим выражение (2) в виде

$$T(t) = (at+b) + T_m \sin(2\pi t/T_{\text{сут}}) + \sigma_T(x(t)), \quad (8)$$

где коэффициенты a и b определяют величину тренда.

Для наглядности теоретических исследований положим, что между сутками средняя температура изменяется на величину ΔT_m , а величина теплового потока изменяется на величину Δq_m .

Для этих условий можно записать уравнения трендов температуры и теплового потока:

$$T = -\Delta T_m (t/T_{\text{сут}}) + T_0, \quad (9)$$

$$q = -\Delta q_m (t/T_{\text{сут}}) + q_0.$$

Определим зависимость термического сопротивления от величины трендов температуры и теплового потока при условии, что величина шумов незначительна.

Результаты расчетов приведены на рис. 3.

Из рисунка видно, что величина тренда 2 град/сут приводит к погрешности определения термического сопротивления не более 6 %, что вполне приемлемо для практики.

При практическом использовании предлагаемого способа определения термического сопро-

тивления необходимо определять оптимальное время регистрации температурных историй.

Результаты теоретического моделирования погрешности определения термического сопротивления с учетом всех указанных выше факторов приведены на рис. 4.

Анализ результатов, приведенных на рис. 4, позволяет сделать следующие выводы.

1. Погрешность определения термического сопротивления по разработанной методике не превышает 10 %, что вполне приемлемо для практики.

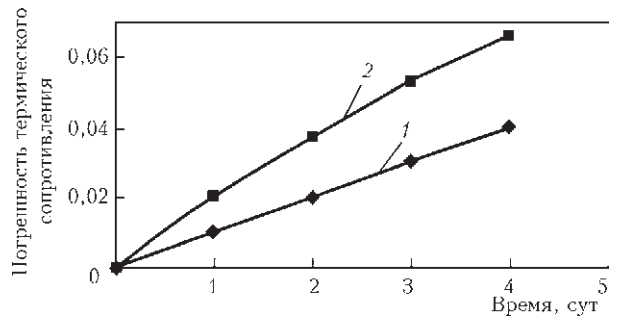


Рис. 3. График модельного эксперимента зависимости погрешности определения термического сопротивления от величины тренда температуры и времени интегрирования: 1 – $\Delta R/R_0$ при $\Delta T_m=0,6$, $\Delta q_m=0,4$; 2 – $\Delta R/R_0$ при $\Delta T_m=1$, $\Delta q_m=0,5$

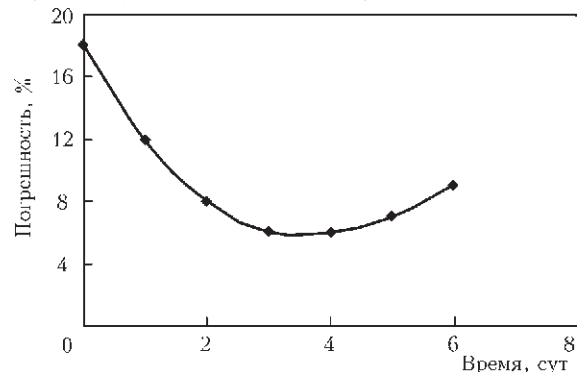


Рис. 4. Зависимость погрешности определения термического сопротивления от времени интегрирования при совокупном действии факторов: шумов и величины тренда ($\Delta R/R_0[\%]$)



2. Существует оптимальное время регистрации температурных историй (время проведения контроля) при проведении контроля по разработанной методике. Это время по результатам теоретического моделирования лежит в диапазоне 2,5...4 сут. Оптимальность определяли по условию минимума погрешности определения термического сопротивления.

Проведена экспериментальная обработка разработанной методики измерения сопротивления теплопередачи многослойной конструкции. Она включает два этапа.

Этап 1. Метрологическая аттестация методики контроля в реальных условиях эксплуатации.

Этап 2. Экспериментальное определение погрешности измерения в реальных условиях контроля на реальных объектах.

Первым этапом экспериментальной обработки разработанной методики является ее метрологическая аттестация, с помощью которой решаются две основные задачи:

- определение систематической ошибки результатов контроля по разработанной методике;
- определение случайной погрешности результатов контроля по разработанной методике.

Систематическую ошибку определяли по формулам [4]:

абсолютное значение систематической ошибки

$$\Delta_{\text{сист}} = R_0 - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{i=N} R_{эi}, \quad (10)$$

относительное значение систематической ошибки

$$\gamma_{\text{сист}} = \frac{\Delta_{\text{сист}}}{P_0}. \quad (11)$$

Определение случайной ошибки результатов контроля осуществлялось по формуле:

$$\sigma_{\text{сл}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{i=N} \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{i=N} R_{эi} - R_{эi} \right)^2}}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{i=N} R_{эi}}. \quad (12)$$

В приведенных формулах использованы следующие обозначения: R_0 – истинное значение сопротивления теплопередаче исследуемой ограждающей конструкции (определяется либо по проектным данным, либо экспериментально); N – количество измерений (не связанных между собой); $R_{эi}$ – определенные значения сопротивления теплопередаче при i -м измерении.

Экспериментальное обеспечение метрологической аттестации осуществлялось следующим образом.

Проводился контроль в соответствии с разработанной методикой шестью ($N=6$) независимыми операторами. Время регистрации температурных историй – трое суток. Ограждающая конструкция для проведения исследований была выбрана с известными теплотехническими характеристиками слоев, постоянными по всей площади расположения преобразователей, а следовательно, и известным термическим сопротивлением $R_0 = 0,7$.

На рис. 5 точками показано расположение температурных преобразователей на наружной поверхности ограждающей конструкции.

В табл. 1 приведены значения сопротивлений теплопередаче, полученные каждым из шести операторов.

После проведения обработки каждым оператором в соответствии с формулами (10)–(12) получены следующие значения погрешности, %: систематическая погрешность – 2,8; случайная – 6.

Таким образом, с помощью метрологической аттестации получены погрешности определения



Рис. 5. Расположение температурных датчиков

Таблица 1. Значения сопротивлений теплопередаче в разных точках ограждающей конструкции

Номер точки расположения датчиков	Приведенный тепловой поток q , Вт/м ²	Приведенная температура на внутренней поверхности $T_{в}$, °С	Приведенная температура на наружной поверхности $T_{н}$, °С	Сопротивление теплопередаче
1	18,9	26,76	13,9	0,68
2	16,27	26,61	14,54	0,74
3	17,2	26,12	14,05	0,7
4	16,5	26,41	14,62	0,715
5	15,4	26	14,23	0,76
6	17,0	26,57	13,96	0,74

сопротивления теплопередаче в пределах 8,8 %, что является вполне приемлемым для практического использования.

При этом нужно учитывать, что это максимальная погрешность, так как в нее входит субъективная ошибка операторов (качество приклея датчиков к поверхности и т.п.).

Второй этап экспериментальной отработки осуществлялся на одном из высотных зданий Москвы.

На рис. 6 приведены экспериментальные, полученные с реальной многослойной конструкции, временные истории (значения в различные последовательные моменты времени) температуры и теплового потока, замеренные на поверхности.

На рис. 7 приведен состав многослойной конструкции, на которой проводились экспериментальные исследования с теплотехническими и геометрическими характеристиками слоев.

Далее осуществляется регистрация температурного поля $T(x,y)$ с поверхности контролируемого объекта (рис. 8).

В табл. 2 приведены сравнительные характеристики величины сопротивления теплопередаче в реперной зоне, определенные в соответствии с заявляемым способом, определенные в соответствии с существующей методикой, описанной в работе [2], и рассчитанные на основании характеристик конструкций стены (см. рис. 8) по формуле:

$$R = \sum_{i=1}^{i=P} \left(\frac{\delta_i}{\lambda_i} \right), \quad (13)$$

где i – номер слоя многослойной конструкции; δ – толщина i -го слоя; λ – теплопроводность материала i -го слоя; P – количество слоев.

Приведенное сопротивление теплопередаче определялось по общеизвестным формулам.

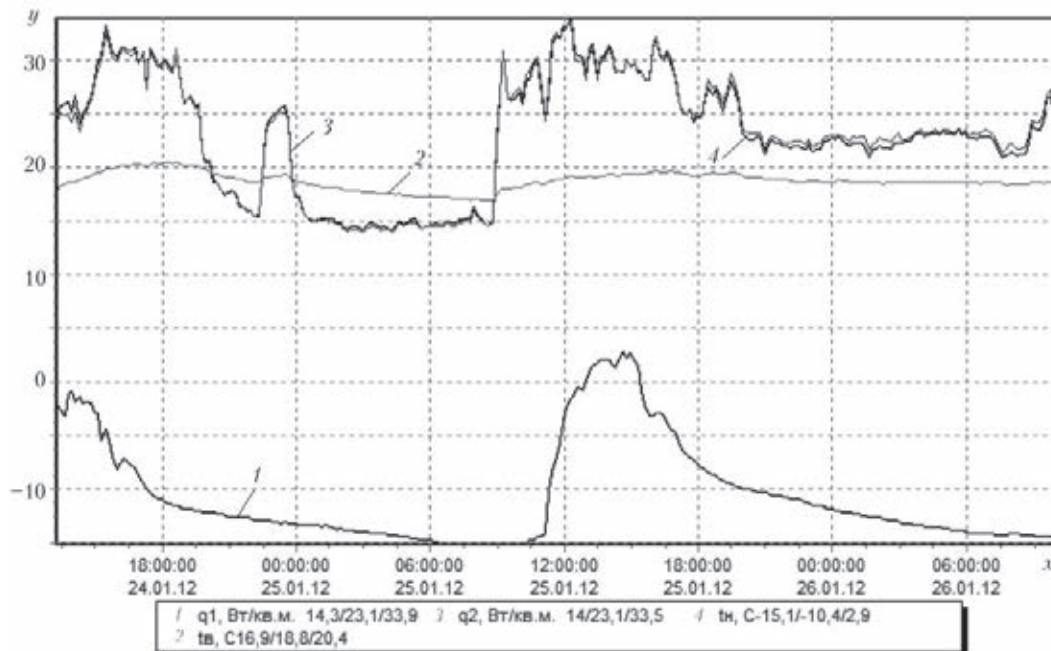


Рис. 6. Графики изменения плотности теплового потока и температуры наружной и внутренней поверхностей стен: y – значения теплового потока и температуры; x – время

Наружная поверхность	Номер слоя	Наименование материала	Плотность, кг/м ³	Теплоемкость, Дж/кг	Теплопроводность, Вт/м ² ·град
	1, 3	Железобетон	2400	840	1,86
	2	Керамзитобетон	500	880	0,19
	Внутренняя поверхность				

Рис. 7. Схематическое изображение и состав многослойной конструкции

Таблица 2. Сравнительные характеристики величин сопротивления теплопередаче

Способ определения величины сопротивления теплопередаче	Сопротивление теплопередаче	Погрешность, %, относительно величины сопротивления теплопередаче
Разработанная технология	0,76	7
Существующая технология	0,84	18
Способ прямого расчета по известным теплотехническим и геометрическим характеристикам конструкции	0,71	–

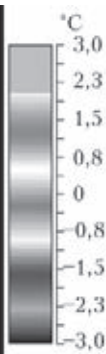


Рис. 8. Регистрация температурного поля с поверхности контролируемого объекта

Рис. 9. Прибор «ИТС-03-ПОТОК»

Из таблицы видно, что разработанная методика кроме исключения названных выше недостатков существующих технологий обеспечивает 2,5-кратное снижение погрешности результатов контроля.

при регистрации температурных историй в интервале 2,5–4 сут.

Результаты исследования реализованы в приборе «Измеритель термического сопротивления ИТС-03-ПОТОК» (рис. 9).

Проведена метрологическая аттестация методики контроля. Показано, что погрешность получаемых результатов (систематическая и случайная) не превышает 8,8.

Технические характеристики прибора

Время измерения термического сопротивления, ч	72
Погрешность измерения, %	не более 8
Пределы измерения, Вт/град	0,3...5,0
Питание (аккумулятор или блок питания), В.....	12
Габаритные размеры, мм.....	160×80×30
Масса, г	300

Экспериментальные исследования методики в реальных условиях эксплуатации подтвердили результаты метрологической аттестации.

Выводы

Разработан объективный метод теплового (тепловизионного) контроля сопротивления теплопередаче многослойных строительных конструкций, позволяющий осуществлять обработку данных без участия оператора.

Разработан прибор, обеспечивающий в автономном режиме измерение термического сопротивления светопрозрачных и нестепрозрачных ограждающих конструкций без участия оператора-расчетчика.

Оптимизированы режимы контроля по разработанной методике. Показано, что наименьшая погрешность результатов контроля достигается

1. ГОСТ 26254–84. Здания и сооружения. Методы определения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций. – Введ. 2.08.1984 г.
2. Будадин О. Н., Потапов А. И. и др. Тепловой неразрушающий контроль изделий. – М.: Наука, 2002. – С. 139–145.
3. Тепловой неразрушающий контроль зданий и строительных сооружений / О.Н.Будадин, Е.В.Абрамова, М.А.Родин, О.В.Лебедев // Дефектоскопия. – 2003. – № 5. – С. 77–94.
4. Сиденко В. Н., Грушко И. М. Основы научных исследований. – Харьков: Высш. шк., 1983. – 223 с.

An objective method of heat (thermal vision) monitoring of thermal resistance of multilayer building structures under real conditions of their service was developed for an objective assessment of rational use of energy resources and ensuring the validity of energy audit results. The method allows data processing without having to solve the inverse problems and practically without operator's participation. Modes of monitoring by the developed procedure were optimized. It is shown that the least error of testing results is achieved at recording the temperature histories over the period of 2.5 – 4 days. Metrological certification of testing procedure was performed. It is shown that the error of the obtained results (systematic and accidental) is not higher than 8.8%. ITS-03-POTOK instrument was developed, ensuring off-line automatic measurement of thermal resistance of translucent and non-translucent filling structures, This instrument was certified as measuring means. 4 References, 2 Tables, 9 Figures.

Keywords: heat (thermal vision) monitoring, thermal resistance, heat transfer resistance, instrumented energy audit

*Поступила в редакцию
26.06.2013*