

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛОВ СО СПЕЦИАЛЬНЫМИ СВОЙСТВАМИ

Докт. техн. наук, проф. ЕСЬМАН Р. И., инженеры ШЕВЦОВ В. Ф.,  
ВАСИЛЬКОВСКИЙ Г. Б.

*Белорусский национальный технический университет,  
ОАО «Темпобур» (г. Москва)*

Экспериментальное оборудование для контактной диагностики теплофизических свойств материалов включает в себя измерительный комплекс для сбора и обработки информации на базе цифрового термометра ТК-5, измерителя-регулятора (ИР) «Сосна-003», индикатора теплового потока ИТП-20М и приборов ИТ-λ-400, ИТ-с-400 для измерений коэффициентов теплопроводности и теплоемкости.

В целях оценки точности измерений необходимо установить возможные ошибки, возникающие при проведении измерений. По характеру ошибки подразделяются на систематические, случайные и промахи.

В случае измерения ИК-облученности калориметром ИМО-2 ошибки могут быть вызваны: дрейфом нуля как следствием теплового движения частей оборудования; погрешностью термостатирования приемника; колебаниями фона сравнения; неточностью установки диафрагмы; непараллельностью направлению измерения; погрешностью калибровки; засветкой посторонними источниками; погрешностью считывания; инструментальной погрешностью прибора.

Оценки на основе измерений показывают, что для режима измерения средней мощности случайная погрешность составляет 4,7 %, погрешность термостатирования приемника ИМО-2 – 0,5 % и для ее снижения использовался экран из Al-ПП пленки. Колебания фона сравнения обусловлены внешними причинами и могут быть устранены выбором помещения. Неточность установки диафрагмы выявлялась ее вращением с проведением дополнительных измерений и составляла <0,3 %. Для калибровки прибора использовался встроенный источник, его погрешность входит в случайную. Погрешность считывания может достигать 1 %, а также может быть включена в случайную. Инструментальная погрешность ИМО-2 определяется потоком излучения и в диапазоне  $3 \cdot 10^{-4}$ –1 Вт составляет  $5 \cdot 10^{-3}$  %, а в диапазоне 1–100 Вт достигает 0,5 %. С учетом изложенного выше можно оценить общую погрешность измерения

$$\sigma = \sigma_{\text{сл}} + \frac{\Delta P_{\text{и}}}{\tau_{\text{с}} R_0 - \epsilon_{\text{с}} \sigma T_{\text{с}}^4 S_0}, \quad (1)$$

где  $\Delta P_{\text{и}}$  – паспортная инструментальная абсолютная погрешность;  $\tau_{\text{с}}$  – пропускание среды;  $\epsilon_{\text{с}}$  – коэффициент излучения среды;  $T_{\text{с}}$  – температура среды;  $S_0$  – площадь диафрагмы. Для предельных значений параметров

( $\tau_c = 1$ ;  $P_0 = 1$  Вт;  $\epsilon_c = 1$ ;  $T_c = 300$  К;  $S_0 = 1$  см<sup>2</sup>;  $\Delta P_n = 5 \cdot 10^{-3}$  Вт) получаем  $\sigma \approx \sigma_{\text{сл}}$ . При измерении с фильтром ( $\tau_\Phi = 0,3$ ) слабых потоков ( $P \approx 10^{-3}$  Вт) с вычитанием фона имеем  $\sigma \approx \sigma_{\text{сл}} + 5 \cdot 10^{-2} = 9,7 \cdot 10^{-2}$ .

Для измерения температурных полей с использованием инфракрасных термографических систем в отличие от контактных методов применяют уравнения, связывающие термодинамическую температуру с измеряемой величиной спектральной яркости. Неполная информация о радиационных свойствах реальных объектов приводит к возникновению методической погрешности измерений, которая может превышать инструментальную погрешность в десятки раз. Для уменьшения методической погрешности используются излучательные свойства объектов и промежуточной среды. В значительной степени упростить задачу корректного измерения температуры конденсированных сред позволяет предварительное экспериментальное определение спектральной излучательной способности исследуемых объектов по спектральной зависимости коэффициента отражения исследуемого объекта.

Камера IR SnapShot 525, использованная в экспериментах, является радиометрическим тепловизором, имеет широкий динамический диапазон, обеспечивающий точное измерение температуры. SnapShot 525 работает как цифровая камера, снимает и обрабатывает термограммы в широком температурном диапазоне, выводит термограмму на цветной четырехдюймовый ЖК-экран. Изображения записываются на встроенной РСМСІА карте памяти, позволяющей записать до 280 термограмм на стандартной 8.0 Мбайт карте серии АТА. Обработка изображений производится с помощью прилагаемого программного обеспечения SnapView, работающего в среде Windows (рис. 1). Для обеспечения точного измерения температуры возможно задание значений коэффициента излучения.

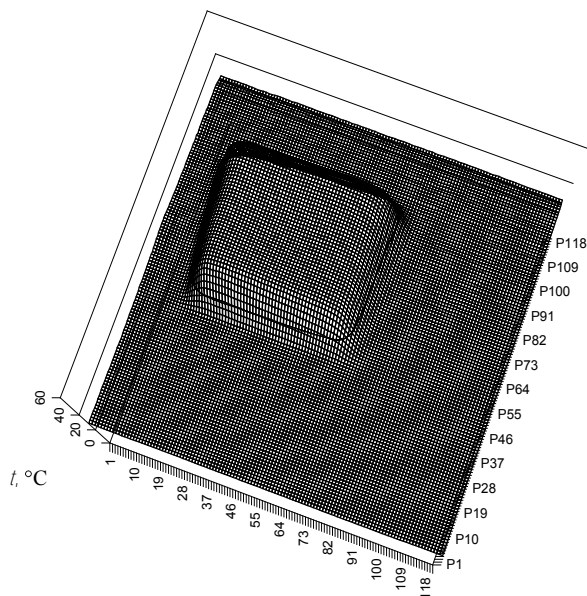


Рис. 1. Термограмма образцовой пластины (кварцевое стекло КВ ГОСТ 15130–69), полученная с помощью инфракрасной термографической системы IR SnapShot 525

В основу методов определения теплофизических характеристик материалов положено решение задачи теплопроводности, устанавливающее связь между временными и пространственными изменениями температуры тела под действием источника теплоты. Так как температурное поле тела зависит от его теплофизических характеристик, по известному изменению температуры в одной или нескольких точках испытуемого тела можно рассчитать его коэффициенты теплопроводности или температуропроводности.

Являясь характеристикой пространственного переноса теплоты, теплопроводность проявляется в условиях заметных градиентов температурного поля внутри вещества. Современная экспериментальная теплофизика не располагает средствами, которые позволяли бы осуществлять непосредственные измерения локального градиента температуры. Для этого чаще всего по результатам измерения локальных дискретных значений температуры в характерных точках образца восстанавливают его температурное поле и через него расчетным способом определяют градиенты температуры в тех сечениях образца, для которых экспериментально измерены или заданы удельные тепловые потоки.

При создании методов измерения и устройств измерения теплопроводности главные затруднения связаны с тем, что необходимо выделить в исследуемом образце изотермическое сечение для установления температурного градиента и удельного теплового потока. С целью упрощения данной проблемы обычно выгодно проводить измерения на образцах простой формы, создавая в них одномерные температурные поля.

В настоящее время известны десятки различных методов и сотни вариантов теплоизмерительных ячеек, предназначенных для определения теплопроводности веществ и материалов. Их многообразие обусловлено различными факторами, среди которых следует выделить: разнообразие возможных способов теплового воздействия на образец; большое различие материалов по теплопроводности, физико-механическим свойствам и использованию удобной для исследований формы образца; ограниченные возможности способов регистрации температур и тепловых потоков, систем нагрева и охлаждения, особенно по уровню рабочих температур опыта.

Теплоемкость является тепловой характеристикой равновесного состояния вещества. В связи с этим все методы ее непосредственного экспериментального определения основываются на принудительном переводе исследуемого образца (посредством поглощения заданного количества теплоты) из исходного равновесного теплового состояния с температурой  $t$  в близкое к нему равновесное состояние с температурой  $t + dt$ . Иногда удается несколько отойти от такой схемы опыта и проводить измерения в условиях незначительной тепловой неравномерности при наличии некоторых градиентов температурного поля внутри образца.

Чаще всего необходимость отхода от классической схемы возникает при создании динамических методов комплексного (одновременного) экспериментального определения теплоемкости и теплопроводности исследуемого вещества. В рассматриваемом случае измерения теплоемкости несколько усложняются, так как приходится регистрировать изменение среднеобъемной температуры образца.

Разнообразие существующих методов измерения теплоемкости обусловлено различиями в способах возбуждения и регистрации вводимой в образец теплоты, использованием различных способов регистрации температуры образца, а также различием вариантов тепловой защиты (адиабатизации) поверхности образца от нежелательных потерь теплоты в окружающую среду.

При разработке методов стремятся использовать несложные решения при тех начальных и граничных условиях, которые можно реализовать в теплофизическом эксперименте. Задача дополнительно упрощается, если измерения проводятся в стационарном тепловом режиме. К сожалению, стационарные методы, как правило, заметно уступают нестационарным по длительности опыта. По этой причине наряду со стационарными методами определения теплопроводности разрабатываются многочисленные варианты нестационарных. При этом часто в одном опыте осуществляется одновременное, комплексное определение теплопроводности, температуропроводности и соответственно удельной теплоемкости образца.

В стационарных методах тепловой поток, проходящий через тело или систему тел, остается постоянным по величине и направлению, т. е. температурное поле будет стационарным. Для этого случая используются закон Фурье

$$Q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} F, \quad (2)$$

и дифференциальное уравнение теплопроводности

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0. \quad (3)$$

Приведенные уравнения не имеют общего решения. Получены частные решения применительно к телам определенной геометрической формы при конкретных условиях однозначности. Их решения относительно одномерных температурных полей для тел простой геометрической формы позволяют вычислить коэффициент теплопроводности из соотношения

$$\lambda = \frac{Q}{T_1 - T_2} K, \quad (4)$$

где  $Q$  – тепловой поток;  $K$  – коэффициент формы исследуемого материала,  $T_1, T_2$  – температуры изотермических поверхностей образца. При относительном определении коэффициента теплопроводности материалов нет необходимости измерять тепловые потоки. Исследуемый образец помещается между пластинками эталона, для которого известна температурная зависимость коэффициента теплопроводности. Если толщина и площадь пластинок и образца одинаковы, то для определения коэффициента теплопроводности используется соотношение

$$\frac{\lambda}{\lambda_0} = \frac{\theta_0}{\theta}, \quad (5)$$

где  $\theta_0, \theta$  – перепады температуры на эталоне и исследуемом образце. Стационарные методы определения теплопроводности являются более точными, чем нестационарные, так как в первом случае начальные распределения температур, теплоемкости вводимых в тело датчиков, а также теплоемкости примыкающих к датчикам пограничных слоев не влияют на величину регистрируемых тепловых потоков. В этом случае величины, входящие в расчетные формулы при установившемся значении, могут быть измерены с высокой точностью. К недостаткам стационарных методов исследования относятся: необходимость значительных затрат времени на подготовку теплового режима, возможность определения только коэффициента теплопроводности, трудности создания одномерного теплового потока.

Теоретический анализ краевых задач теплопроводности показывает, что комплексное определение теплофизических характеристик возможно при помощи методов, основанных на решении уравнения нестационарного поля температур. Эти методы свободны от многих недостатков, присущих стационарным методам, однако дают более высокую погрешность в определении искомых величин. Основное преимущество нестационарных методов состоит в том, что из данных одного непродолжительного опыта можно установить теплопроводность и температуропроводность исследуемого материала, а в квазистационарном режиме – и температурную зависимость этих величин.

При исследовании тепловых параметров методом нестационарного теплового потока используются решения дифференциальных уравнений:

$$\frac{\partial Q}{\partial \tau} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} F; \quad (6)$$

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right). \quad (7)$$

Решения уравнений (6) и (7) приобретают простой вид для тел правильной геометрической формы и определенных граничных условий. При этом имеется возможность установить характер зависимости температурного поля от времени в разных стадиях развития теплового процесса. В начальный период эти зависимости довольно сложны и описываются бесконечными рядами. В последующей, основной, стадии они становятся упорядоченными и математически выражаются более простыми функциями, так как изменение температуры в каждой точке перестает зависеть от начальных условий. Методы определения тепловых свойств веществ в данном случае могут базироваться на решениях задач теплопроводности, полученных применительно как к начальной, так и к основной стадии развития процесса переноса теплоты. В начальной стадии процесса из данных эксперимента можно найти одновременно несколько тепловых свойств.

## ВЫВОД

Проведен анализ методик определения теплофизических характеристик материалов со специальными свойствами. Разработаны оптимальные методики, выбраны аппаратурные средства измерения температуры изучаемых образцов из многослойных материалов в камере лучистой обработки для индикации и контроля тепловых режимов сушки при обработке материалов концентрированными потоками энергии.

Полученные результаты позволяют проводить оптимизацию рабочих характеристик и управлять процессами термообработки при получении новых композиционных материалов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Е с ь м а н, Р. И. Компьютерное моделирование тепловых процессов в многослойных композиционных структурах / Р. И. Есьман, В. Ф. Шевцов // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2006. – № 5. – С. 62–67.

Представлена кафедрой  
промышленной теплоэнергетики  
и теплотехники

Поступила 10.11.2006

УДК 696.2:622.691.4.07

## РЕСУРСОБЕРЕГАЮЩАЯ МЕТОДИКА ГИДРАВЛИЧЕСКОГО РАСЧЕТА РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ

**Канд. техн. наук САВАСТИЕНОК А. Я.**

*УО «Государственный институт повышения квалификации  
и переподготовки кадров в области газоснабжения “Газ-институт”»*

Ресурсосбережение – одна из важных задач, не теряющая актуальности. В статье предлагается методика гидравлического расчета, позволяющая при определенных условиях сокращать затраты на строительство распределительных газопроводов до 10 %.

В настоящее время существуют несколько методик гидравлического расчета, применение которых дает различные результаты. Методики отличаются принципами первоначального расчетного потокораспределения и распределения расчетного перепада давления в направлении. В то же время существуют требования, которым не удовлетворяет ни одна из существующих методик: стандартные значения диаметров в кольцевых сетях подбираются таким образом, что на этапе гидравлической увязки колец происходит существенное изменение потокораспределения по отношению к расчетному; в методиках не учитываются особенности проектирования комбинированных газовых сетей, состоящих как из стальных, так и из полиэтиленовых газопроводов.