

СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ ЭКСПРЕСС-ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПОВЕРХНОСТНЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ СОГЛАСНО ДСТУ БВ.2.7 – 41 (ГОСТ 30290) И ТЕПЛОМЕТРИЧЕСКИМ ЗОНДОВЫМ ПРИБОРОМ ИТ-8М ИТТФ НАН УКРАИНЫ

Декуша О.Л., Декуша Л.В., Воробьев Л.И.

Институт технической теплофизики НАН Украины
г. Киев, Украина

АНОТАЦІЯ: Розглянуто принципи дії, переваги і недоліки двох експрес-методів вимірювання теплопровідності. Запропоновано розробити стандарт, що регламентує вимірювання теплопровідності методом локальної теплової дії із застосуванням поверхневих зондів, що містять перетворювачі теплового потоку і температури .

АННОТАЦИЯ: Рассмотрены принципы действия, достоинства и недостатки двух экспресс-методов измерения теплопроводности. Предложено разработать стандарт, регламентирующий измерение теплопроводности методом локального теплового воздействия с применением поверхностных зондов, содержащих преобразователи теплового потока и температуры.

ABSTRACT: The principles of action, advantages and disadvantages of two rapid methods for measuring thermal conductivity are considered. It is proposed to develop standard for regulation the measurements of thermal conductivity by method of the local thermal effects with using surface probes, containing heat flux and temperature transducers.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: измерение теплопроводности, поверхностный зонд, метод локального теплового воздействия, преобразователь теплового потока.

Вследствие острой необходимости экономии энергоресурсов в жилищно-коммунальном хозяйстве, а также в административных, производственных и общественных зданиях, постоянно возрастают требования к качеству теплоизоляции новых и термомодернизируемых зданий и сооружений.

Для решения этих задач промышленность Украины выпускает как традиционные теплоизоляторы, так и новые, недавно созданные теплоизоляционные материалы и изделия. Много новых высокоэффективных изоляционных материалов и изделий импортируют из-за границы. Качество всех этих материалов необходимо контролировать не только при начальной или периодической сертификации, но и при выпуске на производстве, а при необходимости, и при поставке на строительные площадки. Важнейшим показателем качества теплоизолятора является его теплопроводность, но к сожалению, вследствие продолжительности тепловых процессов, стандартизированные и относительно точные методы измерений теплопроводности строительных

материалов [1] нуждаются в значительных затратах времени на изготовление специальных образцов исследуемого материала, проведение испытаний, а для их реализации используют дорогое и громоздкое оборудование. Поэтому необходимым является создание малогабаритных средств измерения теплопроводности теплоизоляционных и строительных материалов, которые позволяют проводить экспресс-измерения. В Украине такие приборы серийно не производят, а заграничные средства измерений слишком дороги и не всегда позволяют исследовать неоднородные строительные и теплоизоляционные материалы.

В Украине и странах СНГ действует стандарт [2], регламентирующий метод определения теплопроводности поверхностным преобразователем. Стандарт распространяется на строительные материалы и изделия теплопроводностью от 0,02 до 1,0 Вт/(м·К) и устанавливает метод неразрушающего ускоренного определения теплопроводности в интервале температур 278 – 313 К (5...40 °С). Метод заключается в создании одностороннего кратковременного теплового импульса на поверхности изделия и регистрации изменения температуры на этой поверхности. Метод основан на аналитическом решении идеализированной задачи нестационарной теплопроводности в системе двух соприкасающихся полубесконечных тел, в зоне контакта которых действует импульсный источник теплоты [3].

Для испытаний применяют измерительный комплекс (рис. 1), состоящий из:

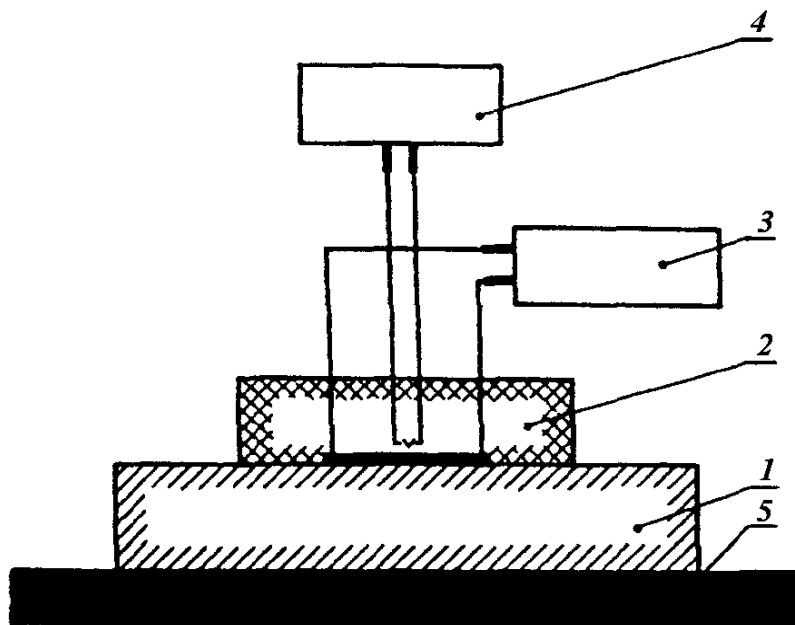


Рис. 1. Блок-схема измерительного комплекса для определения теплопроводности материалов изделий

- первичного преобразователя 2, предназначенного для преобразования импульса электрической энергии в тепловую и создании электрического сигнала, характеризующего изменение температуры поверхности материала изделия под воздействием теплового импульса;
- вторичного измерительного прибора 4 для регистрации электрического сигнала;
- импульсного источника тока 3 с таймером теплового импульса, обеспечивающего нагрев пластины первичного преобразователя.

Комплекс устанавливают на исследуемое изделие 1, которое расположено на основании 5.

В стандарте [2] подробно рассмотрено устройство первичного преобразователя. Он представляет собой цилиндр из пенополистирола (тело первичного преобразователя) плотностью 150 кг/м^3 , диаметром 140 и высотой 55 мм. В середине плоскости одного из его оснований, заподлицо с ним, размещена круглая пластина радиусом 20 мм — для изделий толщиной более 15 мм, 60 мм — для изделий толщиной менее 15 мм из бронзового листа толщиной 0,15—0,25 мм, служащая для передачи тепла от нагревательного элемента к исследуемому образцу. К центру диска припаян один из "горячих" спаев двух термопар, выводы которых соединены последовательно. Спаи электроизолированы друг от друга и зафиксированы каплей эпоксидной смолы. "Холодные" спаи термопар утоплены вглубь тела цилиндра.

Вокруг "горячих" спаев термопар расположен плоский нагреватель, прилегающий к плоскости пластины и электроизолированный от нее, представляющий собой спираль из константановой проволоки (с сопротивлением 40 Ом для изделий толщиной 15 мм, 20 Ом — для изделий толщиной менее 15 мм). Выводы нагревателя соединены проводами с таймером теплового импульса, а выводы термопар — экранированным проводом с вторичным измерительным устройством.

Испытания проводят при установившемся тепловом равновесии между исследуемым изделием, телом первичного преобразователя и окружающей средой, для чего устанавливают первичный преобразователь на поверхность изделия и выдерживают до появления на табло вторичного измерительного прибора установившихся показаний. Регистрируют установившийся сигнал, поступающий от первичного преобразователя, и включают автоматическую запись значений этого сигнала. Подают тепловой импульс и через равные промежутки времени регистрируют изменение сигнала, пропорционального избыточной температуре поверхности исследуемого изделия. Регистрацию проводят до появления повторяющихся значений.

Значение теплопроводности исследуемого изделия определяют при обработке массива экспериментальных данных. При этом используют элементы экспериментального массива, которые находятся в рабочей области, определяемой при градуировке прибора в зависимости от плотности исследуемого материала. При расчете теплопроводности используют также значения четырех определяемых при градуировке коэффициентов, зависящих от мощности теплового импульса, чувствительности датчика температуры, размеров нагревателя, теплофизических свойств первичного преобразователя. В стандарте [2] указано, что «погрешность определения теплопроводности данным методом составляет не более 7 %».

Приборы, работающие по методу стандарта [2], не получили широкого распространения ни в Украине, ни в других странах СНГ. Нам известен лишь один прибор БИ-Т021А, некоторое время производившийся в Украине одной из фирм, специализирующихся на оборудовании для строительных лабораторий [4]. Опыт эксплуатации таких приборов вскрыл ряд присущих методу недостатков. Прежде всего, это сложность и неоднозначность градуировки прибора. Для градуировки необходимо иметь не менее трех материалов с известной теплопроводностью и объёмной теплоемкостью. Необходимо также установить рабочие области различных материалов, в зависимости от их плотности. Под рабочей областью понимают некоторую ограниченную область значений массива экспериментальных данных, для которых применяемые расчетные формулы можно считать корректными. Необходимость предварительного установления рабочей области для каждого из видов контролируемых материалов связана с применением упрощений при решении задачи нестационарной теплопроводности и, соответственно, с применяемыми упрощенными расчетными

формулами. Второй присущий методу недостаток – необходимость обеспечения высокой плоскостности участка поверхности изделия, на который устанавливается первичный преобразователь. Небольшие неровности поверхности могут привести к наличию зазора между нагревателем и поверхностью изделия, что вызывает искажения нестационарного теплового поля по сравнению с теоретическим решением и увеличение погрешности измерения. Указанные недостатки метода приводят к недостоверности измерений – значительному превышению погрешности измерений по сравнению со значением, указанным в стандарте.

В ИТТФ НАНУ разработан новый метод и прибор ИТ-8М, также основанные на локальном тепловом воздействии на ограниченный участок поверхности изделия или образца материала, в котором, однако, измерения проводятся при тепловом режиме, близком к стационарному [5].

Суть неразрушающего стационарного метода локального теплового воздействия заключается в подведении теплового потока постоянной плотности к поверхности исследуемого образца через ограниченное пятно контакта с зондом. При этом значение коэффициента теплопроводности находят по результатам измерения в стационарном тепловом состоянии плотности потока теплового воздействия q и разности значений температуры в центре пятна воздействия T_{II} и на периферии T_{∞} поверхности, где тепловым влиянием воздействия можно пренебречь. Для идеализированного случая, когда температура поверхности тела внутри пятна воздействия принята постоянной и на свободной поверхности образца теплообмен с окружающей средой отсутствует, формула для расчета коэффициента теплопроводности исследуемого материала имеет достаточно простой вид [6]:

$$\lambda = \frac{\pi}{4} \cdot r_{II} \cdot q / (T_{II} - T_{\infty}), \quad (1)$$

где r_{II} – радиус пятна теплового воздействия.

Явное преимущество этого метода состоит в возможности определения коэффициента теплопроводности на образцах, не требующих специальной подготовки, в том числе и на готовых изделиях без изготовления из них специального образца конкретной формы. К основному недостатку относится то, что на практике такие измерения проводят, как правило, при наличии конвективно-радиационного теплообмена поверхности образца с окружающей средой (ОС). В связи с этим применение формулы (1) приводит к существенным погрешностям результатов измерения.

Температурное поле, которое возникает из-за локального теплового воздействия, исследовано путем решения классического уравнения теплопроводности для системы «исследуемый образец в виде полубесконечного массива – зонд». В рассматриваемой системе приняты следующие граничные условия: к поверхности полубесконечного массива материала с теплопроводностью λ в круговой области радиусом r_{II} подведен тепловой поток с плотностью q , а на остальной поверхности осуществляется теплообмен с окружающей средой при эффективном коэффициенте теплообмена $\alpha_{эф}$. Температура массива на большом расстоянии от зоны воздействия и температура окружающей среды остаются одинаковыми и постоянными.

Решение уравнения теплопроводности при заданных граничных условиях в безразмерных координатах $\rho = r/r_{II}$, $\xi = z/r_{II}$, для избыточной температуры $\vartheta(\rho; \xi) = (T(r; z) - T_{OC})$ на поверхности исследуемого тела имеет вид [7]:

$$\vartheta(\rho; \xi) = \frac{q \cdot r_{II}}{\lambda} \cdot I(\rho; \xi), \quad (2)$$

$$\text{где } I(\rho; \xi) = \int_0^{\infty} \frac{\exp(-\xi \cdot x) \cdot J_1(x) \cdot J_0(\rho \cdot x)}{x + Bi} dx, \quad (3)$$

J_0 и J_1 – функции Бесселя первого рода нулевого и первого порядка;

$Bi = \alpha_{\text{эф}} \cdot r_{II} / \lambda$ – число Био.

Проведены теоретические и экспериментальные исследования различных факторов, влияющих на результаты измерений. Для исследования теплоизоляционных материалов, содержащих неоднородные включения размером до 2...3 мм, целесообразно применять приборы радиусом пятна воздействия $r_{II} \geq 10$ мм.

Установлено, что для прибора с $r_{II} = 10$ мм, основной вклад в искажения результатов измерений вносят теплообмен на свободной поверхности образца для материалов с $\lambda \leq 0,2$ Вт/(м·К) и контактное тепловое сопротивление при $\lambda > 0,2$ Вт/(м·К). Сформулированы рекомендации по уменьшению контактного сопротивления и стабилизации коэффициента теплообмена. По результатам сравнения решений для образцов в виде полубесконечного массива и пластины конечной толщины рассчитаны, а затем проверены экспериментально значения корректирующего коэффициента, позволяющего проводить корректные измерения на изделиях конечной толщины.

Разработанный прибор ИТ-8М имеет три зонда, контактирующих с поверхностью исследуемого изделия, причем первичные преобразователи теплового потока и температуры в двух зондах включены по дифференциальной схеме. Такая схема позволяет существенно уменьшить негативное влияние на точность измерения ряда возмущающих факторов – изменения температуры образца в процессе измерения, начальной неравномерности температуры в образце и т.п. Из трех зондов прибора первый зонд является основным, предназначенным для задания локального теплового воздействия на ограниченную зону поверхности контролируемого объекта, второй зонд является зондом-референтом и третий зонд предназначен для измерения температуры поверхности образца, при которой выполнены измерения коэффициента теплопроводности, а также для обеспечения механической устойчивости теплового блока. Расстояние между зондами выбрано так, чтобы второй и третий зонды находились вне зоны теплового воздействия первого зонда.

Основной зонд и зонд-референт имеют одинаковое устройство, а их конструктивная схема приведена на рис. 2. Центральным узлом каждого зонда является тепловая головка, приклеенная к держателю 1, соединенному с корпусом 2 посредством гибкого шарнира 3. Тепловая головка основного зонда и зонда-референта выполнены идентичными и состоят из электрического нагревателя 4, преобразователя теплового потока (ПТП) 5 и температуровыравнивающей пластинки 6, в которую вмонтированы спаи двух дифференциальных хромель-алюмелевых термопар 7 и 8. Спаи, вмонтированные в пластинку 6 основного зонда, являются рабочими, а зонда-референта – опорными. Сигналы преобразователей выведены гибким жгутом проводов 9. Тепловая головка третьего зонда содержит только одну хромель-алюмелевую термопару для измерения температуры отнесения получаемых результатов измерения коэффициента теплопроводности.

Регулирование электрической мощности, подаваемой на нагреватель, осуществляется по показаниям одной из двух дифференциальных термопар, при этом другая термопара применяется для измерения разности температуры рабочих поверхностей основного зонда и референта, соответствующей разности значений температуры в зоне пятна теплового воздействия и на периферии.

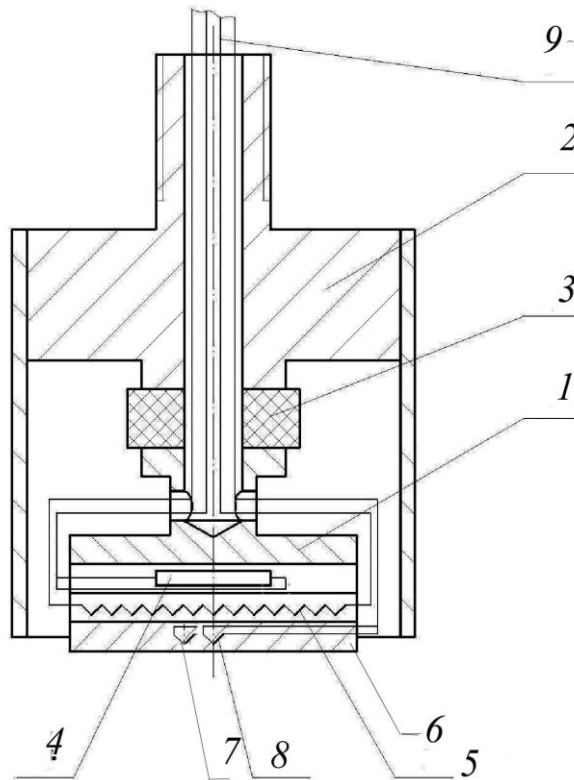


Рис. 2. Конструктивная схема зонда

Каждый прибор ИТ-8М отградуирован индивидуально с применением образцов, изготовленных из материалов, зарегистрированных в качестве рабочих эталонов единицы теплопроводности или материалов с хорошо изученной и известной теплопроводностью. Контрольные образцы из дополнительных материалов предварительно проверены на установке для измерения коэффициентов теплопроводности с нормированной погрешностью. Материалы отобраны таким образом, чтобы значения их коэффициента теплопроводности представляли диапазон измерения прибора ИТ-8, характерный для теплоизоляционных строительных материалов, то есть от $0,02 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ до $1,5 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$. По результатам градуировки прибора находят аппроксимационную функцию, связывающую отношение дифференциальных сигналов первичных преобразователей со значением коэффициента теплопроводности материала. Прибор ИТ-8М работает совместно с компьютером (ноутбуком), программное обеспечение которого позволяет оператору контролировать процесс измерения и рассчитывать по аппроксимационной функции значение измеренной теплопроводности.

Внешний вид прибора и варианты его расположения относительно образца представлены на рис. 3.

Изготовлены, прошли метрологическую аттестацию и эксплуатируются в организациях Украины 4 экземпляра прибора. Приборы имеют погрешность $5\text{...}8\%$, время измерения (с учетом выхода на режим, близкий к стационарному) – не более 30 минут. Прибор, работающий в нестационарном тепловом режиме по методу ДСТУ БВ.2.7 – 41, имеет время измерения около 4 минут (без учета времени установления теплового равновесия). Формально он является более быстродействующим, чем прибор, работающий по разработанному в ИТТФ методу, но по упомянутым выше причинам, для него характерна погрешность, значительно превышающая указанное в стандарте значение.



Рис. 3. Внешний вид прибора и варианты его расположения относительно образца

Успешный опыт эксплуатации нескольких экземпляров прибора ИТ-8М свидетельствует о возможности более широкого применения этих приборов для экспресс-измерения коэффициента теплопроводности. Целесообразным является разработка и внедрение в Украине стандарта, регламентирующего измерение теплопроводности методом локального теплового нагрева с применением поверхностных зондов, которые содержат включенные по дифференциальной схеме преобразователи теплового потока и температуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Матеріали і вироби будівельні. Метод визначення теплопровідності і термічного опору при стаціонарному тепловому режимі: ДСТУ Б В.2.7-105-2000 (ГОСТ 7076-99).
2. Матеріали і вироби будівельні. Метод визначення теплопровідності поверхневим перетворювачем: ДСТУ Б В.2.7-41-95 (ГОСТ 30290-94).
3. Теплофизические измерения и приборы / [Платунов Е.С., Буравой С.Е., Курепин В.В., Петров Г.С.]. – Л.: Машиностроение, 1986. – 256 с.
4. <http://rushkolnik.ru/docs/index-21290944.html>.
5. Декуша О.Л. Универсальный прибор ИТ-8М для измерения коэффициента теплопроводности строительных материалов / О.Л. Декуша, Л.И. Воробьев, Л.В. Декуша // Вимірювальна техніка та метрологія : міжвід. наук.-техн. зб. — Львів : Національний університет "Львівська політехніка", 2008. — Вип.68. — С.101–107.
6. Миснар А. Теплопроводность твердых тел, жидкостей, газов и их композиций / Миснар А.; пер. с фр. – М.: Мир, 1968. – 464 с.
7. Кулаков М.В. Измерение температуры поверхности твердых тел / Кулаков М.В., Макаров Б.И. // Библиотека по автоматике. - Вып. 598.– М., 1979. – 96 с.

Статья поступила в редакцию 10.03.2012 г.