

Результаты измерений теплопроводности твердых неметаллических материалов и жидкостей

Д-р техн. наук И. В. БАРАНОВ, Е. Ю. ИВАШКО (МИХЕЕВА)

Санкт-Петербургский государственный университет низкотемпературных и пищевых технологий
191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9

An automatic instrument to measure ИТС-λ-20 thermal conductivity of homogeneous solid nonmetallic materials, heat-conducting pasty substances and liquids under normal conditions (open environment, room temperature) have been considered at this research. Measuring results of thermal conductivity of various materials by means of this device have been presented at the tables.

Key words: thermal conductivity, thermal cell, temperature sensor, temperature heat capacity, thermal diffusivity.

Ключевые слова: теплопроводность, тепловая ячейка, температурный датчик, теплоемкость, температуропроводность.

Теплофизические характеристики материалов являются основными в ходе тепловых расчетов. Для решения задач тепло- и массообмена наиболее часто используется теплопроводность вещества. В широкой области состояния материалов их теплофизические характеристики (ТФХ) остаются стабильными и слабо зависят от внешних условий: температуры, давления и влажности. В настоящее время появилось большое количество новых конструкционных материалов, тепловые характеристики которых необходимо измерять. Ввиду того что сейчас отсутствует промышленный выпуск теплофизических приборов, многие организации испытывают трудности с измерениями ТФХ вновь создаваемых материалов.

В данной работе рассматривается новый автоматизированный прибор ИТС-λ-20, предназначенный для измерения теплопроводности однородных твердых неметаллических материалов, теплопроводящих пастообразных веществ и жидкостей при нормальных условиях (открытая среда, комнатная температура). Данный прибор разработан в межфакультетской учебной лаборатории «Иновационные технологии» СПбГУНПТ.

Прибор имеет настольное исполнение и включает в себя два электрически связанных блока, состоящих из тепловой ячейки и контроллера 2(рис. 1). Контроллер разработан коллективом ООО «ЛМТ» по техническому заданию лаборатории и обеспечивает автоматизацию опыта. Тепловая ячейка, в свою очередь, состоит из основания 1 и съемного верхнего блока (колпака) 3.

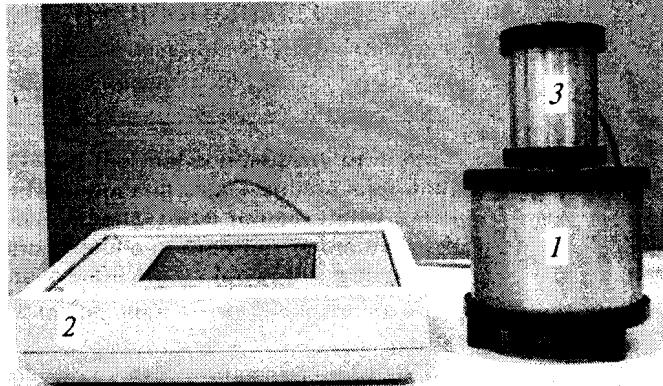


Рис. 1. Внешний вид прибора

Основные элементы тепловой ячейки находятся в съемном колпаке 3. Это электрический нагреватель, теплоизоляционная прослойка и температурный датчик.

В основе принципа действия данного прибора лежат закономерности регулярного теплового режима. Температура модель выбранного метода измерения и распределение температурных полей основных элементов тепловой ячейки показаны на рис. 2. Сущность данного метода заключается в том, что образец 1 состоит в тепловом контакте с металлическим ядром 2, в котором находится электрический нагреватель 5. С противоположной стороны нагревателя располагаются тонкая теплоизоляционная прослойка 3, обеспечивающая выгодное соотношение между тепловыми потоками через образец и саму

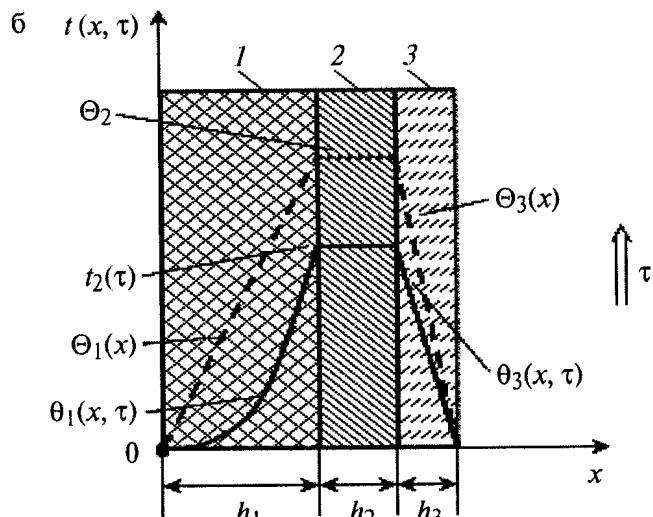
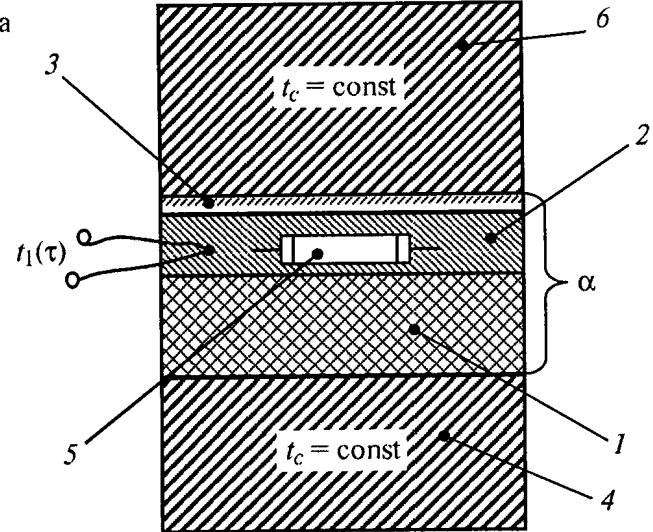


Рис. 2. Термовая модель метода (а) и распределение температурных полей основных элементов тепловой ячейки (б)

прослойку, и верхний блок 6, который в процессе опыта сохраняет температуру окружающей среды. Нижняя рабочая грань образца контактирует с внешней изотермической средой 4. В процессе измерения на нагревателе выделяется тепловой поток заданной мощности, которая в ходе опыта поддерживается постоянной. С помощью термодатчика регистрируется температура нагревателя $t_1(\tau)$, отождествляемая с температурой $t(\tau)$ контактирующей с ним грани образца. В качестве датчика температуры используется односпайная дифференциальная термопара, изготовленная из манганина и константана. Образцы исследуемого материала должны быть изготовлены в виде дисков диаметром $(30 \pm 0,1)$ мм и толщиной $((5 \div 15) \pm 0,1)$ мм.

Для определения теплопроводности исследуемого материала высотой h и площадью поперечного сечения S была использована математическая модель, включающая дифференциальное уравнение теплопроводности

$$\frac{\partial^2 t_1}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial t_1}{\partial \tau}; \quad (1)$$

выбраны краевые условия

$$\begin{cases} t_1(0, \tau) = 0; \quad t_1(h_1, \tau) = t_2(\tau); \\ t_3(h_1 + h_2, \tau) = t_2(\tau); \quad t_3(h_1 + h_2 + h_3, \tau) = 0; \\ \lambda_1 S \frac{\partial t_2(x, \tau)}{\partial x} = W_2 - C_2 \frac{\partial t_2}{\partial \tau} - K_3 t_2(\tau) \end{cases} \quad (2)$$

и приняты допущения

$$\begin{cases} \frac{\partial t_2}{\partial x} = \frac{\partial t_2}{\partial \tau} = 0; \quad \frac{\partial^2 t_2}{\partial x^2} = 0; \\ W_2 = \text{const}; \quad t_c = \text{const}; \quad \lambda_1 = \text{const}, \end{cases} \quad (3)$$

где h — высота образца, м;

λ_1 — теплопроводность исследуемого материала, Вт/(м·К);

S — площадь поперечного сечения образца, м²;

W_2 — мощность нагревателя, Вт;

C_2 — теплоемкость ядра, Дж/К;

t_1, t_2, t_3 — температура образца, тепловой изоляции и окружающей среды, °С;

K_3 — тепловая проводимость теплоизоляционной прослойки, Вт/К.

С помощью данной математической модели были получены расчетные соотношения для определения теплопроводности твердых материалов

$$\lambda_s = \frac{h}{\frac{S}{W_2/\Theta - K_n(h)} - 2P_k}; \quad (4)$$

жидких и пастообразных веществ

$$\lambda_l = \frac{h}{S} \left(\frac{W_2}{\Theta} - K_0 \right), \quad (5)$$

где $K_n(h)$ и K_0 — тепловая проводимость ячейки, учитывающая влияние тепловых потерь через теплоизоляционную прослойку и теплообмен через боковые грани образца;

$2P_k$ — контактное сопротивление, м²·К/Вт.

Параметры $K_n(h)$, K_0 и $2P_k$ являются постоянными тепловой ячейки и определяются в градиуровочных

опытах на материалах с хорошо изученными теплофизическими свойствами (полиметилметакрилат, кварцевое стекло, дистиллированная вода, толуол). На образцы из полиметилметакрилата и кварцевого стекла были получены свидетельства о поверке в ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева».

Возможность определения теплопроводности жидких и пастообразных веществ обусловлена тем, что нагреватель располагается в верхней части тепловой ячейки, что позволяет уменьшить влияние конвекции. Образец помещается в специальную кювету высотой 3 мм и внутренним диаметром 30 мм.

Методика проведения опыта для определения теплопроводности исследуемого материала включает в себя следующие действия.

1. Перед началом опыта оператором с помощью контроллера задаются исходные параметры: высота h и площадь S образца, значение мощности W , интервал между измерениями $\Delta\tau$, общее число измерений N . В исходном состоянии верхний блок (колпак) плотно прижимается к торцевой поверхности основания, что обеспечивает изотермичность элементов ядра теплоизмерительной ячейки.

2. Затем колпак поднимается, на основание устанавливается образец (кувета с исследуемым материалом) и закрывается колпаком. Оператор начинает опыт. После этого контроллер берет на себя все управление опытом: подает питание на нагреватель, с заданным временным интервалом опрашивает температурный датчик, преобразует первичные сигналы датчика в температурный перепад, отображает на дисплее текущие показания термодатчика. При переходе к очередному шагу контроллер подает короткий звуковой сигнал.

Контроллер, если не было вмешательства оператора, самостоятельно заканчивает опыт после заданного числа шагов и извещает о его завершении длинным звуковым сигналом. На индикаторе под полем графика высвечиваются в экспоненциальной форме измеренные значения стационарного перепада Θ (в кельвинах) и теплопроводности λ [Вт/(м·К)]. Данные опыта хранятся в памяти контроллера и могут быть переданы на персональный компьютер для последующего анализа.

Пример обработки первичной информации показан на рис. 3 (в приведенной на рисунке формуле m — темп регулярного нагрева образца, с^{-1} ; A — коэффициент, косвенно отражающий начальный перепад температуры образца относительно среды). Результат аппроксимации: $\Theta = 16,2 \text{ К}$; $m = 0,00137 \text{ с}^{-1}$.

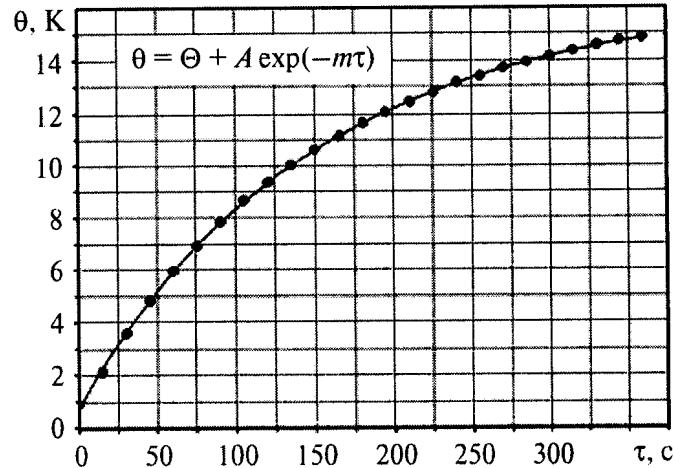


Рис. 3. Пример результата аппроксимации $\theta(\tau)$

экспериментальных данных

(• — эксперимент; — — сглаживающая кривая)

С помощью данного прибора были проведены измерения некоторых твердых неметаллических веществ, теплопроводящих паст и жидкостей, предоставленных ФГУП «Государственный научно-исследовательский институт химии и технологии элементоорганических соединений» (г. Москва) и кафедрой техники мясных и молочных производств СПбГУНиПТ (Санкт-Петербург). Результаты измерений приведены в табл. 1 и 2. Относительная погрешность измерения теплопроводности составляла 3–5 %.

Таким образом, был разработан автоматизированный прибор для измерения теплопроводности однородных твердых неметаллических материалов, теплопроводящих пастообразных веществ и жидкостей при нормальных условиях. Проведена градуировка прибора на материалах с хорошо изученными свойствами. Метрологический анализ показал, что измерения теплопроводности были проведены с погрешностью 3–5 %. Проведены измерения теплопроводности различных материалов. Теплопроводность исследуемых образцов может составлять 0,10–7,0 Вт/(м·К). При определенной доработке методики данный прибор может быть также использован для измерения удельной теплоемкости и температуропроводности материалов, т. е. быть комплексным.

Таблица 1

Образец	$\lambda_{\text{изм}}$, Вт/(м·К)	$\lambda_{\text{спр}}$, Вт/(м·К)
Полиметилметакрилат, ГОСТ 17622–72	0,196	0,196 [1]
Оптический плавленый кварц, ГОСТ 161130–79	1,32	1,350 [1], [2]
Оптическое стекло ТФ1, ГОСТ 13659–78	0,704	0,699 [1], [3]
Сплав ВТ6, ГОСТ 19807–74	7,10	6,825 [1]
Паста теплопроводная спеченная 131-179, ТУ 6-02-1-342-86	1,901	—

Таблица 2

Образец	$\lambda_{изм}$, Вт/(м·К)	$\lambda_{спр}$, Вт/(м·К)
Толуол	0,135	0,135 [4]
Дистиллированная вода	0,597	0,610 [5]
Касторовое масло Р 67.554.109	0,182	0,182 [6]
Глицерин ЛСР-001947/09	0,275	0,285 [6]
Паста кремнийорганическая теплопроводная КПТ-8, ГОСТ 19783-74	0,680	0,700 [7]
Паста теплопроводная 131-179, ТУ 6-02-1-342-87	1,20	—
Жидкость «ПМС 100»	0,162	—
Масло моторное М-63	0,141	0,134 [8]
Масло моторное полусинтетическое «Лукойл SG-40»	0,145	—
Сметана 15 %-я, ТУ 9222-058-05268977-04	0,548	—
Крахмал картофельный, ГОСТ 7699-78	0,0860	0,0800 [6]
Йогурт 2,1 %-й жирности	0,471	—
Йогурт 5,2 %-й жирности	0,528	—

Список литературы

1. Теплофизические измерения и приборы / Е. С. Платунов, С. Е. Буравой, В. В. Курепин, Г. С. Петров; Под общ. ред. Е. С. Платунова. — Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1986.
2. Баранов И. В. Теория, методы и средства комплексного исследования теплофизических свойств в режиме разогрева–охлаждения: Дис. докт. техн. наук. СПб., 2007.
3. Кондратьев Г. М. Тепловые измерения. — М.; Л.: Машгиз, 1957.
4. Сычев В. В., Александров А. А., Ершова С. А. ГСССД 8-86. Таблицы стандартных справочных данных. — М.: Изд-во стандартов, 1978.
5. Справочник по теплопроводности жидкостей и газов / Н. Б. Варгафтик, Л. П. Филипов и др. — М.: Энергоатомиздат, 1990.
6. Таблицы физических величин: Справ. / Под ред. акад. И. К. Кикоина. — М.: Атомиздат, 1976.
7. Паста кремнийорганическая теплопроводная. Технические условия: ГОСТ 19783-74. — М: Изд-во стандартов, 1982.
8. Петухов Б. С. Справочник машиностроителя. Т. 2. — М.: Машгиз, 1960.