

УДК 536.2.08

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА НА БАЗЕ ПРИБОРА ИТ-3 ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ МАТЕРИАЛОВ

© И. В. Рогов, Н. Ю. Полунина, А. В. Рожков, Н. П. Жуков¹*Статья поступила 29 сентября 2014 г.*

Описана измерительная система, предназначенная для определения теплопроводности широкого класса веществ и материалов стационарным методом плоского слоя с использованием автоматической функции контроля за достижение стационарной стадии.

Ключевые слова: измерительная система; математическое моделирование; параметр недогрева; автоматизация процесса измерения.

В связи с развитием отраслей промышленности, где применяются различные конструкционные и теплоизоляционные материалы, разрабатываются автоматизированные приборы и измерительные системы для определения теплофизических свойств (ТФС) таких материалов.

Разработка приборов и средств для теплофизического эксперимента требует индивидуального подхода к автоматизации с применением универсального оборудования и специального программного обеспечения.

Современный автоматизированный теплофизический эксперимент должен обеспечивать не только получение измерительной информации с датчиков, но и управление экспериментом, запись, обработку, анализ и хранение данных, а также визуализацию измерительного процесса в интерактивной форме. Таким требованиям отвечают современные информационно-измерительные системы для определения теплофизических свойств материалов, а также для исследования релаксационных переходов в полимерных материалах неразрушающим способом [1 – 3].

В настоящее время разрабатываются автоматизированные измерительные системы, реализующие стационарный и нестационарный методы определения ТФС материалов. Особенностью стационарных методов является создание стационарного одномерного теплового потока через образец, обеспечивающего постоянное распределение температуры в нем. Стационарные методы теплового режима отличаются надежностью при определении теплопроводности материалов.

В традиционных приборах и измерительных системах, предназначенных для исследования теплопроводности материалов, не предусматривается контроль за достижением стационарной стадии процесса, что оказывает субъективное влияние на процесс измерения. Поэтому поставлена задача разработки автоматизированной измерительной системы, позволяющей

определять теплопроводность материала при стационарном режиме теплового воздействия на него, обеспеченном автоматическим контролем во время теплофизического эксперимента.

Для исследования теплопроводности λ твердых тел широко применяется измеритель теплопроводности ИТ-3. Данный прибор предназначен для измерения теплопроводности стационарным методом плоского слоя широкого класса веществ и материалов, в том числе грубодисперсных, сыпучих, резин в виде пластин и пакетов.

С целью расширения возможностей данного измерительного средства разработана измерительная система (ИС) на базе измерителя теплопроводности ИТ-3 (рис. 1).

Тепловой поток через исследуемый образец III формируется плоским электрическим нагревателем 2. Для отвода тепла и поддержания постоянной температуры в системе термостатирования теплоизмерительной ячейки (ТИЯ) I используется термостат II. Температура поверхностей образца в процессе исследований определяется ленточными термопарами 3 и 4, помещенными в эластичные резиновые прокладки для исключения контактных термических сопротивлений. Сосуд Дьюара IV обеспечивает поддержание свободных спаев термопар при температуре 0 °С. Измерение теплового потока, проходящего через образец в верхней части холодильника 6, осуществляется датчиком теплового потока 5.

Механизм перемещения I ТИЯ позволяет вращением верхнего фланца поднимать или опускать подвижную внутреннюю вставку с нагревателем, обеспечивая возможность сначала вставить образец с прокладками, а затем плотно прижать весь пакет к охлаждающему.

Основным средством автоматизации ИС является блок управления и измерений VII, который включает в себя следующие модули:

¹ Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов, Россия; e-mail: natalika.gold@mail.ru

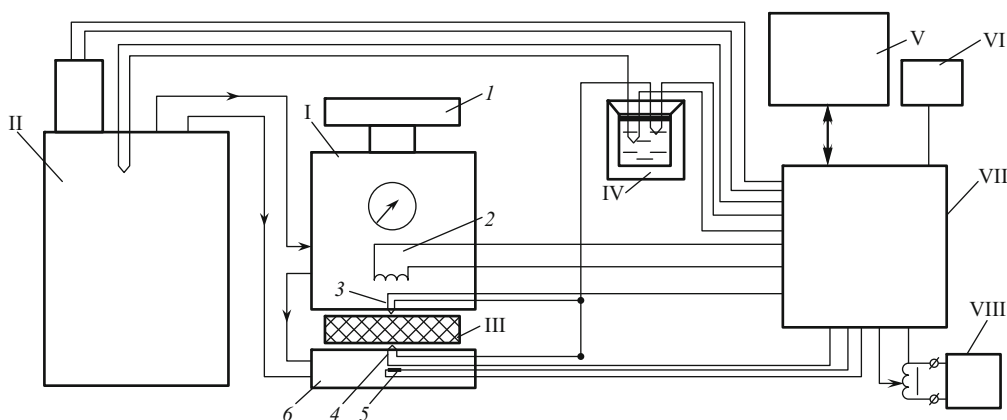


Рис. 1. Схема измерительной системы

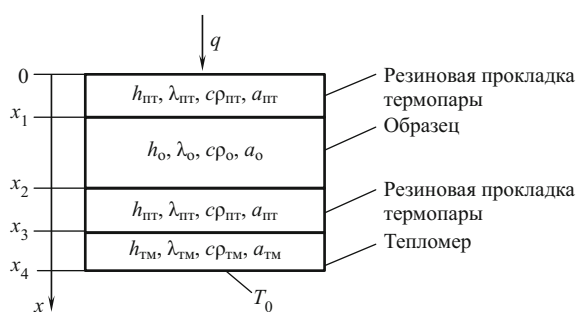


Рис. 2. Тепловая схема эксперимента

а) управляющий — обеспечивает управление остальными модулями и взаимодействие с программным обеспечением компьютера V;

б) измерительный — для аналого-цифрового преобразования сигналов термпар, расположенных в ТИЯ и термостате, а также сигнала с датчика теплового потока;

в) управления теплового воздействия на образец — обеспечивает задание вида закона изменения теплового потока через образец;

г) управления термостатом — поддерживает на заданном уровне температуру жидкости в термостате.

Для установки заданной электрической мощности, выдаваемой нагревателем, используется лабораторный автотрансформатор VIII. Питание блока управления и измерений обеспечивается с помощью стабилизированного источника постоянного тока VI.

Процесс измерения контролируется и управляется программным обеспечением персонального компьютера, который взаимодействует с блоком управления и измерений через шину USB.

Важной составляющей программного обеспечения в автоматизированных системах измерений является контроль за ходом эксперимента. В разработанной ИС процесс определения ТФС (в частности теплопроводности λ) осуществляется на стационарной стадии, причем измерения могут проходить на нескольких стадиях при различных температурных режимах и тепловых потоках. Поэтому для автоматизации

процесса измерения необходимо сформулировать параметр, по которому можно оценить время начала стационарной стадии. В качестве такого объективного параметра выбрана относительная величина недогрева до стационарной стадии. Искомый параметр недогрева определяется в результате решения математической задачи распространения тепла в ТИЯ.

На рис. 2 приведена тепловая схема термоизмерительной ячейки.

Четырехслойная система имеет равномерное начальное температурное распределение T_0 . В начальный момент времени $\tau_0 = 0$ на свободную поверхность верхней резиновой прокладки термпары действует постоянный источник тепла с плотностью теплового потока q . Свободная поверхность тепломера поддерживается при постоянной температуре, равной начальной T_0 . Требуется определить распределение температуры в данной системе в любой момент времени.

В математической форме задача сформулирована следующим образом.

Дифференциальные уравнения теплопроводности имеют следующий вид:

$$\frac{\partial T_1(x, \tau)}{\partial \tau} = a_{пт} \frac{\partial^2 T_1(x, \tau)}{\partial x^2}, \tau > 0, 0 < x < x_1;$$

$$\frac{\partial T_2(x, \tau)}{\partial \tau} = a_o \frac{\partial^2 T_2(x, \tau)}{\partial x^2}, \tau > 0, x_1 < x < x_2;$$

$$\frac{\partial T_3(x, \tau)}{\partial \tau} = a_{пт} \frac{\partial^2 T_3(x, \tau)}{\partial x^2}, \tau > 0, x_2 < x < x_3;$$

$$\frac{\partial T_4(x, \tau)}{\partial \tau} = a_{тм} \frac{\partial^2 T_4(x, \tau)}{\partial x^2}, \tau > 0, x_3 < x < x_4,$$

где $a_{пт}$, a_o , $a_{тм}$ — температуропроводность резиновых прокладок термпар, образца и тепломера соответственно; $T_1(x, \tau)$, $T_2(x, \tau)$, $T_3(x, \tau)$, $T_4(x, \tau)$ — распределения температуры в резиновой прокладке верхней термпары, в образце, в резиновой прокладке нижней термпары, в тепломере соответственно.

Начальные условия:

$$T_i(x, 0) = T_0, \quad 0 < x < x_1; \quad i = 1 \dots 4.$$

Граничные условия:

$$-\lambda_{\text{пт}} \frac{\partial T_1(0, \tau)}{\partial x} = q, \quad \tau > 0;$$

$$T_1(x_1, \tau) = T_2(x_2, \tau), \quad \tau > 0;$$

$$\lambda_{\text{пт}} \frac{\partial T_1(x_1, \tau)}{\partial x} = \lambda_o \frac{\partial T_2(x_1, \tau)}{\partial x}, \quad \tau > 0;$$

$$T_2(x_2, \tau) = T_3(x_2, \tau), \quad \tau > 0;$$

$$\lambda_o \frac{\partial T_2(x_2, \tau)}{\partial x} = \lambda_{\text{пт}} \frac{\partial T_3(x_2, \tau)}{\partial x}, \quad \tau > 0;$$

$$T_3(x_3, \tau) = T_4(x_3, \tau), \quad \tau > 0;$$

$$\lambda_{\text{пт}} \frac{\partial T_3(x_3, \tau)}{\partial x} = \lambda_{\text{тм}} \frac{\partial T_4(x_3, \tau)}{\partial x}, \quad \tau > 0;$$

$$T_4(x_4, \tau) = T_0, \quad \tau > 0.$$

Здесь

$$x_1 = h_{\text{пт}}; \quad x_2 = h_{\text{пт}} + h_o; \quad x_3 = h_{\text{пт}} + h_o + h_{\text{тм}};$$

$$x_4 = h_{\text{пт}} + h_o + h_{\text{пт}} + h_{\text{тм}};$$

($h_{\text{пт}}$, h_o , $h_{\text{тм}}$ — толщины резиновых прокладок термопар, образца и тепломера соответственно); $\lambda_{\text{пт}}$, λ_o , $\lambda_{\text{тм}}$ — теплопроводности резиновых прокладок термопар, образца и тепломера соответственно.

Решение краевой задачи теплопроводности может быть представлено в виде

$$T_i(x, \tau) = T_{\text{ст}}(x) - \sum_{n=1}^{\infty} \varphi(\mu_n, x) \exp\left(-\mu_n^2 \frac{a_o \tau}{h_o^2}\right),$$

где μ_n — корни характеристического уравнения $\psi(\mu) = 0$, причем

$$\mu_1 < \mu_2 < \dots < \mu_{\infty}.$$

Разность температуры между показаниями термопар (перепад температуры на образце)

$$T(x, \tau) = T_{\text{ст}}(x) - b \exp(-m\tau) + \varepsilon_c(\tau), \quad (1)$$

где $\varepsilon_c(\tau)$ — быстро убывающая со временем функция.

Теплопроводность исследуемого образца рассчитывается по формуле

$$\lambda = h_o \frac{k_{\text{т}}}{k_{\text{д}}} \frac{e}{\Delta e},$$

где $k_{\text{т}}$ — чувствительность термопары; $k_{\text{д}}$ — коэффициент преобразования теплового потока в т.д.с. датчика; e — сигнал датчика теплового потока, соответствующий стационарной стадии; Δe — сигнал дифференциальной термопары, соответствующий стационарной стадии.

Величины e и Δe пропорциональны разности температур на тепломере и образце соответственно. При-

чем разность температур на образце может быть рассчитана по формуле

$$\Delta t_0 = \Delta e / k_{\text{т}}.$$

Температуры верхней и нижней частей образца определяются как

$$t_{\text{в}} = e_1 / k_{\text{т}} + t_{\text{д}}; \quad t_{\text{н}} = e_2 / k_{\text{т}} + t_{\text{д}};$$

где e_1 , e_2 — сигналы датчиков теплового потока с верхней и нижней ленточных термопар; $t_{\text{д}}$ — температура свободных спаев термопар (температура в сосуде Дьюара).

Точность определения теплопроводности исследуемого образца будет зависеть от того, насколько близко к стационарной стадии проводились измерения.

Для контроля за ходом эксперимента вводится параметр недогрева до стационарной стадии

$$\beta = \frac{\Delta T_{\text{ст}} - \Delta T}{\Delta T_{\text{ст}}}, \quad (2)$$

где $\Delta T_{\text{ст}}$ — разность температур на стационарной стадии; ΔT — разность температур, соответствующая текущему моменту времени.

В соответствии с формулой (1) можно записать:

$$\Delta T_{\text{ст}} - \Delta T \approx b \exp(-m\tau).$$

Величины ΔT , b и m определяются в процессе эксперимента, а значение $\Delta T_{\text{ст}}$ будет известно только по окончании эксперимента.

Расчетным соотношением для определения параметра недогрева является формула

$$\beta \approx b \exp(-m\tau) / \Delta T. \quad (3)$$

Для определения величин b и m продифференцируем уравнение (3) по времени:

$$v(\tau) = \frac{d\Delta T(\tau)}{d\tau} = b m \exp(-m\tau) + \frac{d\varepsilon_c(\tau)}{d\tau}, \quad (4)$$

где v — скорость нагрева.

Значение $d\varepsilon_c(\tau)/d\tau$ значительно меньше величины $b m \exp(-m\tau)$ и будет влиять на результаты расчета β только на начальном этапе эксперимента. Поэтому величиной $d\varepsilon_c(\tau)/d\tau$ в формуле (4) можно пренебречь. С учетом этого допущения прологарифмировав выражение (4), получим

$$\ln[v(\tau)] = \ln bm - m\tau. \quad (5)$$

Уравнение (5) имеет вид линейной зависимости, параметры которой $\ln bm$ и m определяются методами регрессионного анализа.

Таким образом, для расчета величин b и m необходимо в процессе измерения строить зависимость логарифма скорости нагрева от времени и определять па-

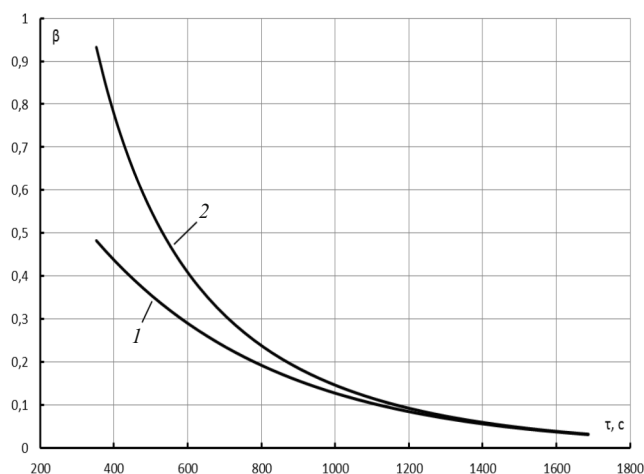


Рис. 3. Изменение параметра недогрева от времени

параметры полученной линейной зависимости методами регрессионного анализа.

На рис. 3 приведены зависимости изменения параметра недогрева β , рассчитанного по формуле (2) — кривая 1 и по формуле (3) — кривая 2.

Как видно из рис. 3, при приближении к стационарной стадии величина параметра недогрева, рассчитанного по формуле (1), асимптотически приближается к значению параметра недогрева, рассчитанного по формуле (2). Причем величины зависимости (2) всегда больше значений выражения (1).

Параметр недогрева β позволяет автоматически с помощью разработанного программного обеспечения контролировать достижение стационарной стадии теплового режима в процессе эксперимента, что исключает субъективный фактор, оказывающий влияние на достижение стационарной стадии эксперимента. При этом значение систематической составляющей погрешности определения теплопроводности материалов не будет превышать заданного значения параметра недогрева.

При первичных опытных измерениях погрешность определения теплопроводности полиметилметакрилата с помощью разработанной ИС составила 5–6 %.

На рис. 4 приведен интерфейс программы, предназначенной для регулирования мощности на нагревателе ТИЯ. Программа обеспечивает сбор и обработку первичной измерительной информации, контроль за ходом эксперимента и расчет теплопроводности исследуемого материала.

Для корректной работы ИС перед началом эксперимента в программе необходимо задать следующие параметры: температуру холодных спаев термопар; толщину образца; пороговое значение параметра недогрева, по которому будет определяться достижение стационарной стадии; постоянную температуру жидкости в термостате; мощность на нагревателе ТИЯ в процентах от максимального значения (см. рис. 1).

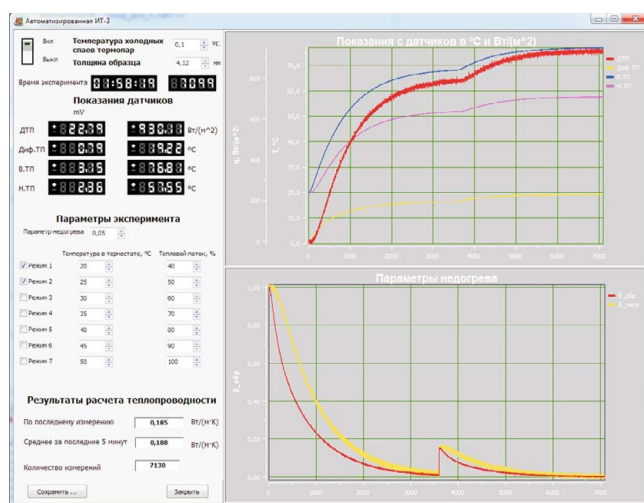


Рис. 4. Интерфейс программы управления ходом эксперимента

Программа позволяет реализовывать несколько режимов работы ИС. Такая необходимость может возникнуть при исследовании температурной зависимости теплопроводности образца. Программа самостоятельно переключается на другой режим, когда достигается стационарная стадия нагрева (на рис. 4 показано два таких режима нагрева).

Таким образом, разработанная ИС, реализующая стационарный метод теплового режима, позволяет определять теплопроводность исследуемого материала с использованием автоматической функции контроля за достижением стационарной стадии.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Рогов И. В., Тузилина Н. Ю., Полунин Е. П., Майникова Н. Ф.** Измерительная система на базе бикалориметра, реализующая многомодельный метод определения теплофизических свойств / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2011. Т. 77. № 8. С. 36–39.
2. **Майникова Н. Ф., Балашов А. А., Васильев С. О.** Неразрушающий способ исследований релаксационных переходов в полимерных материалах / Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2014. Т. 20. № 1. С. 34–41.
3. **Майникова Н. Ф., Мищенко С. В., Жуков Н. П., Рогов И. В.** Методы и средства неразрушающего теплового контроля структурных превращений в полимерных материалах. — Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. — 320 с.

REFERENCES

1. **Rogov I. V., Tuzhilina N. Yu., Polunin E. P., Mainikova N. F.** Izmeritel'naya sistema na baze bikalorimetra, realizuyushchaya mnogomodel'nyi metod opredeleniya teplofizicheskikh svoystv / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2011. Vol. 77. N 8. P. 36–39 [in Russian].
2. **Mainikova N. F., Balashov A. A., Vasil'ev S. O.** Nerazrushayushchii sposob issledovaniya relaksatsionnykh perekhodov v polimernykh materialakh / Vestn. Tambov. Gos. Tekhn. Univ. 2014. Vol. 20. N 1. P. 34–41 [in Russian].
3. **Mainikova N. F., Mishchenko S. V., Zhukov N. P., Rogov I. V.** Metody i sredstva nerazrushayushchego teplovogo kontrolya strukturnykh prevrashchenii v polimernykh materialakh. — Tambov: Izd. TGTU, 2012. — 320 p. [in Russian].