

Динамический калориметр для комплексных теплофизических измерений

Д.т.н. Платунов Е.С., д.т.н Баранов И.В., аспирант Михеева Е.Ю.

alenkam2005@mail.ru

Санкт-Петербургский государственный университет
низкотемпературных и пищевых технологий (СПбГУНИПТ)

В настоящее время появляется большое количество современных конструкционных материалов, тепловые характеристики которых необходимо измерять. В данной работе представлен новый автоматизированный прибор ДК–сЛ–400, предназначенный для определения удельной теплоемкости и теплопроводности твердых неметаллических материалов в режиме монотонного нагрева.

Ключевые слова: теплопроводность, теплоемкость, тепловая ячейка, температурный датчик, комплексные измерения, динамический метод.

Практический интерес к комплексным динамическим методам возник после появления современной высокочувствительной аналого-цифровой измерительной техники и, в частности, электронных автоматизированных контроллеров. Возникли предпосылки для создания новых методов измерений, рассчитанных на автоматизированный сбор и компьютерную обработку экспериментальной информации. Новые эксплуатационные возможности контроллеров оказались особенно полезными при разработке комплексных динамических методов, которые рассчитаны на изучение тепловых свойств веществ и материалов в широкой области температур, и предполагают компьютерную обработку большого объема первичных результатов каждого опыта.

В настоящей работе рассматривается динамический калориметр ДК–сЛ–400, предназначенный для измерения удельной теплоемкости и теплопроводности однородных твердых неметаллических материалов в режиме нагрева от комнатной температуры до 400°С (рис. 1). Данный прибор разработан в межфакультетской учебной лаборатории «Инновационные технологии» СПбГУНИПТ. Прибор состоит из тепловой ячейки и контроллера.

Принципиальная схема тепловой ячейки показана на рис. 2. Основными элементами тепловой ячейки являются: массивный металлический блок 1; ниж-

ний градиентный тепломер 2; верхний градиентный тепломер 3; металлический колпак 4 с электрическим нагревателем 5; образец 6; теплозащитная оболочка 7. Блок 1 служит основанием ячейки и в опытах всегда сохраняет комнатную температуру. Каждый тепломер состоит из металлического основания и лицевой металлической пластинки, которые жестко соединены друг с другом через тонкую теплоизоляционную прослойку.



Рис. 1. Внешний вид прибора.

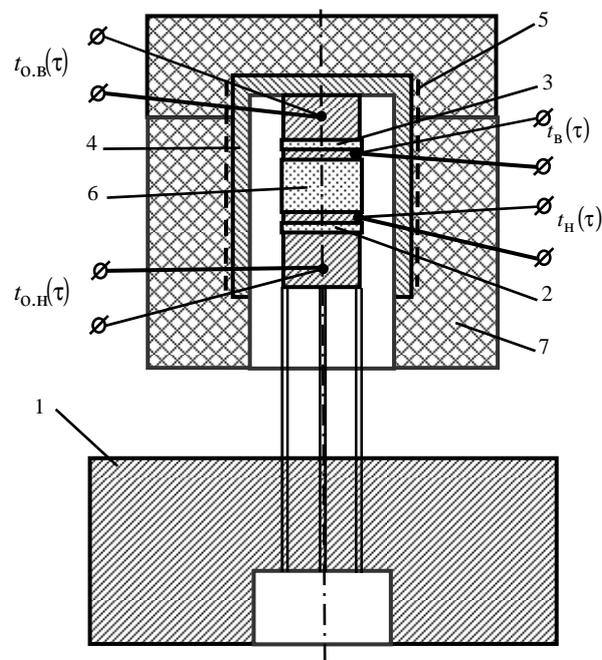


Рис.2. Схема тепловой ячейки.

Нижний тепломер 2 жестко связан с блоком 1 через стойки, а верхний тепломер 3 имеет возможность перемещаться вдоль вертикальной оси ячейки, что обеспечивает удобную установку образца между тепломерами. Оболочка 7 обеспечивает стабильное прижимное давление и надежный тепловой контакт между тепломерами и образцом.

Для разогрева образцов используется электрический нагреватель 5, размещенный на наружной поверхности колпака 4. Он обеспечивает плавный разогрев колпака, который через контакт с верхним тепломером разогревает образец и тепломеры. Следовательно, ячейка обеспечивает изменение температуры образца односторонним тепловым потоком, проникающим через него сверху вниз. Для пассивной тепловой защиты боковых поверхностей образца и тепломеров используется воздушная кольцевая оболочка, образуемая между ними и колпаком.

Для температурных измерений используются четыре термопары: $t_{o,в}(\tau)$, $t_{o,н}(\tau)$, $t_{н}(\tau)$, $t_{в}(\tau)$. Зоны размещения их рабочих спаев в ячейке показаны

точками как на рис. 2, так и на рис. 3, иллюстрирующем тепловую модель метода. Рабочие спаи термопар постоянно вмонтированы в основания и лицевые пластинки тепломеров, а "холодные" спаи размещаются в блоке 1 ячейки (на рисунке не показаны).

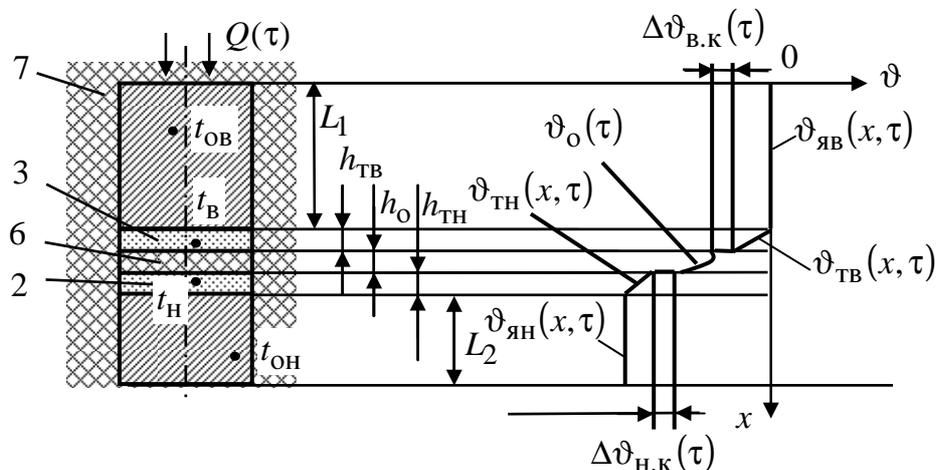


Рис. 3. Тепловая модель метода.

Измеряемые градиентными тепломерами тепловые потоки вычисляются с помощью соотношений

$$Q_{Т.Н}(\tau) = K_{Т.Н}(t)\vartheta_{Т.Н}(\tau), \quad Q_{Т.В}(\tau) = K_{Т.В}(t)\vartheta_{Т.В}(\tau), \quad (1)$$

где $K_{Т.Н}(t)$, $K_{Т.В}(t)$ – тепловые проводимости нижнего и верхнего тепломеров, Вт/К; $\vartheta_{Т.Н}(\tau)$, $\vartheta_{Т.В}(\tau)$ – показания тепломеров, равные температурным перепадам в их теплоизоляционных прослойках (рис. 3), т. е. между термопарами, которые вмонтированы в их основания и лицевые пластинки

$$\vartheta_{Т.В}(\tau) = t_{О.В}(\tau) - t_{В}(\tau), \quad \vartheta_{Т.Н}(\tau) = t_{О.Н}(\tau) - t_{Н}(\tau). \quad (2)$$

Учтем влияние контактных тепловых сопротивлений между образцом и лицевыми пластинками тепломеров. Скачок температуры на контактах определяется выражениями

$$\Delta\vartheta_{В.К}(\tau) = Q_{Т.В}(\tau)P_K/S, \quad \Delta\vartheta_{Н.К}(\tau) = Q_{Т.Н}(\tau)P_K/S, \quad (3)$$

где P_K – удельное тепловое сопротивление одного контакта, S – площадь поперечного сечения образца, м².

Следовательно, температурный перепад на образце оказывается связанным с измеряемым в опыте температурным перепадом $\vartheta_{В.Н}(\tau) = t_{В}(\tau) - t_{Н}(\tau)$ между пластинками тепломеров соотношением

$$\vartheta_о(\tau) = \vartheta_{В.Н}(\tau) - [Q_{В.Н}(\tau) - Q_{Т.Н}(\tau)]P_K/S. \quad (4)$$

Между потоками, которые регистрируются тепломерами, и потоками через грани образца имеются различия

$$Q_{Т.Н}(\tau) = K_{Т.Н}(t) \vartheta_{Т.Н}(\tau) - C_T(t) b(\tau), \quad Q_{Т.В}(\tau) = K_{Т.В}(t) \vartheta_{Т.В}(\tau) - C_T(t) b(\tau), \quad (5)$$

где $C_T(t)$ – теплоемкость лицевой пластинки тепломера (с учетом теплоемкости половинки теплоизоляционной прослойки), $b(\tau)$ – скорость изменения температуры на тепломере, К/с.

Следует учесть влияние прямого теплообмена колпака с образцом через разделяющее их воздушное кольцо. В оптимальных условиях боковой тепловой поток Q_α должен оставаться малым и не выходить за рамки поправки к потокам через тепломеры. Для определения теплоемкости можно ограничиваться его упрощенной аналитической оценкой в общем тепловом балансе и вычислять по формуле

$$Q_\alpha(\tau) \cong \alpha h_0 \Pi \bar{\vartheta}(\tau), \quad (6)$$

где α – эффективный коэффициент теплоотдачи в воздушном зазоре между колпаком и образцом, Вт/(м²·К); Π – периметр образца, м; h_0 – суммарная толщина образца и боковых поверхностей тепломеров, м; $\bar{\vartheta}(\tau)$ – средний перепад температуры между колпаком и образцом, К. При этом можно упрощенно принимать, что температура колпака близка к температуре основания верхнего тепломера, так как они имеют хороший тепловой контакт между собой.

Учитывать влияние бокового теплообмена на теплопроводность несколько сложнее. Однако оно проявляется гораздо слабее, чем у теплоемкости, поэтому им чаще всего удается пренебрегать или же учитывать его экспериментально, при калибровке тепломеров ячейки.

После учета всех перечисленных факторов расчетные формулы для теплопроводности и удельной теплоемкости образца приобретают вид

$$\lambda(t) = \frac{h_0}{\frac{2S \vartheta_{В.Н}}{K_{Т.В}(t) \vartheta_{Т.В} - K_{Т.Н}(t) \vartheta_{Т.Н}} - 2P_K}, \quad (7)$$

$$c(t) = \frac{1}{M} \left[\frac{K_{Т.Н}(t) \vartheta_{Т.Н} + K_{Т.В}(t) \vartheta_{Т.В} + Q_\alpha}{b_{ov}(\tau)} - 2C_T(t) \right], \quad (8)$$

где $b_{ov}(\tau)$ – средняя объемная скорость разогрева образца, К/с; $2C_T(t)$ – суммарная теплоемкость лицевых пластинок тепломеров, Дж/К; $2P_K$ – суммарное удельное контактное тепловое сопротивление. В формулах потоки считаются положительными, если проникают в образец.

Параметры $K_{Т.Н}(t)$, $K_{Т.В}(t)$ и $2P_K$ являются постоянными прибора и определяются в градуировочных опытах на материалах с хорошо изученными теплофизическими свойствами (медь, кварцевое стекло). Диаметр образцов исследуемого материала составляет 20 мм, а их высота – от 1 до 20 мм. Образцы требуют контроля на плоскостность и шлифовки плоских граней с применением притирочной пасты. Чтобы определить контактное сопротивление, ставят опыт с образцом из меди. Для определения коэффициента тепловых потерь проводят серию опытов с плавленным кварцем различной высоты. Для данной ячейки были получены следующие значения этих параметров:

$$K_{Т.Н}(t) = 0,0574 + 1,25 \cdot 10^{-4} t_H, \quad K_{Т.В}(t) = 0,0839 + 1,06 \cdot 10^{-4} t_B, \quad (9)$$

$$2P_K = 13,2 \cdot 10^{-4},$$

где t_B и t_H – температуры верхней и нижней лицевых пластинок, °С.

На рис. 4 отражен общий характер изменения температур основных элементов тепловой ячейки при работе в режиме динамического разогрева.

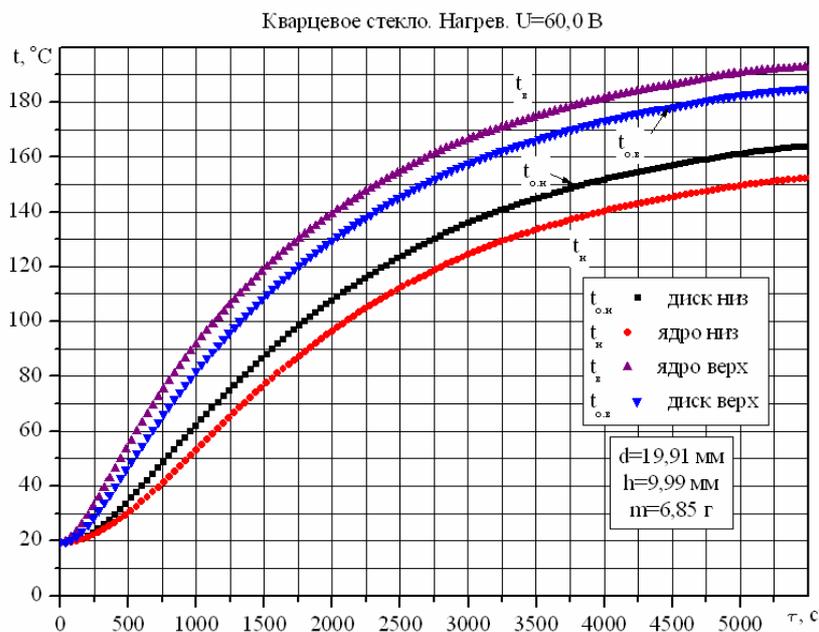


Рис.4. Изменение температур основных элементов тепловой ячейки в ходе опыта от времени.

Экспериментальные данные для различных материалов, полученные с помощью данного прибора, и их значения из справочных данных [1] представлены на рис. 5 и 6.

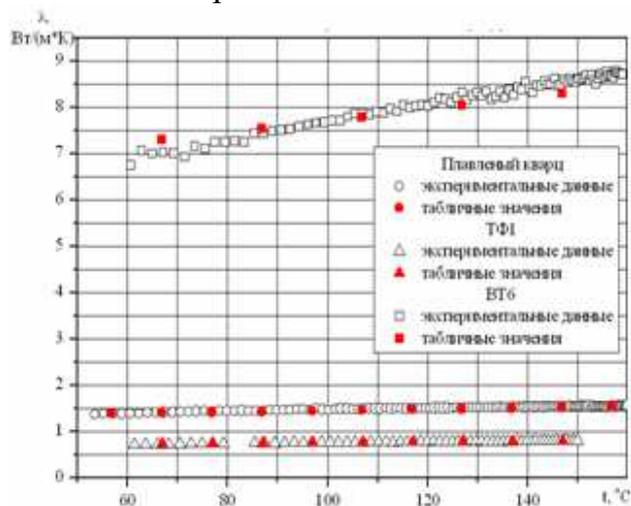


Рис.5. Зависимость теплопроводности от температуры.

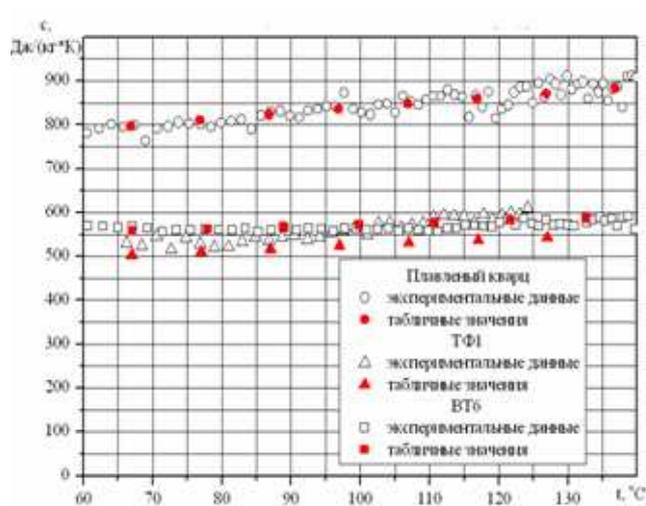


Рис. 6. Зависимость удельной теплоемкости от температуры.

Метрологический анализ показал, что относительная погрешность измерения теплопроводности составляет (3...5) %, удельной теплоемкости – (5...8) %. Теплопроводность исследуемых образцов может составлять (0,15...7,0) Вт/(м·К), а удельная теплоемкость – (500...4200) Дж/(кг·К).

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, 256 с.
2. Баранов И.В. Теория, методы и средства комплексного исследования теплофизических свойств в режиме разогрева-охлаждения. Дис. докт. техн. наук. СПбГУНИИТ, СПб, 2007.
3. Кондратьев Г.М. Тепловые измерения М. – Л.: Машгиз, 1957. 244 с.

Dynamic calorimeter for complex thermalphysic measuring

Platunov E.C., Baranov I.V., Miheeva E.Y. alenkam2005@mail.ru

Saint-Petersburg state university of refrigeration and food engineering

Today a lot of new modern construction materials appear which thermal characteristics should be measured. New automatic instrument ДК-сλ-400 to measure thermal capacity and thermal conductivity of homogeneous solid nonmetallic materials at monotonous heating mode have been considered at this research.

Key words: thermal conductivity, thermal capacity, thermal cell, temperature sensor, complex measuring, dynamic method.