

Автоматизированный прибор для комплексных исследований теплофизических свойств жидкостей и пастообразных материалов

Баранов И.В., д.т.н. Куслиева Е.В., Ушакова О.К.

Санкт-Петербургский государственный университет
низкотемпературных и пищевых технологий

В настоящей работе рассматривается автоматизированный прибор для комплексного измерения теплофизических характеристик жидкостей и пастообразных материалов, разработанный на кафедре физики СПбГУНиПТ.

Ключевые слова: автоматический прибор, теплофизические характеристики.

В настоящей работе рассматривается автоматизированный прибор (ИТС– λ са–20) для комплексного измерения теплофизических характеристик (ТФХ) жидкостей и пастообразных материалов, разработанный на кафедре физики СПбГУНиПТ. В основе принципа действия данного прибора использованы закономерности регулярного теплового режима [1, 2].

Прибор ИТС– λ са–20 позволяет определять в одном опыте теплопроводность λ , удельную изобарную теплоемкость c и коэффициент температуропроводности a вблизи комнатной температуры (примерно 20 °С). Теплопроводность исследуемых образцов может изменяться в пределах 0,10...0,70 Вт/(м·К), удельная теплоемкость – 2,0...4,2 кДж/(кг·К), температуропроводность – $(0,7\text{К } 1,4) \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$.

Конструктивно прибор выполнен в виде двух блоков: теплоизмерительной ячейки и специализированного электронно–вычислительного устройства (контроллера). Данный прибор занимает площадь 0,25 м² на рабочем столе.

Принципиальная схема тепловой ячейки представлена на рис. 1. В массивном металлическом блоке 3 имеется цилиндрическая глухая полость. В ней размещается цилиндрическая металлическая ампула 1 со встроенными в нее электрическим нагревателем 4 и термодатчиком 5. Ампула имеет шесть сквозных отверстий. Внутри полости ампулы располагается концентрично, между нею и блоком образуется фиксированный зазор толщиной δ . Исследуемая жидкость 2 (или пастообразный материал) одновременно заполняет зазор и отверстия ампулы. Под воздействием электрического нагревателя 4 постоянной мощности W система “жидкость в зазоре – ампула – жидкость в отверстиях” стремится к неравновесному стационарному состоянию. В качестве датчика температуры используется трехспайный дифференциальный термостолбик, изготовленный из манганина и константана.

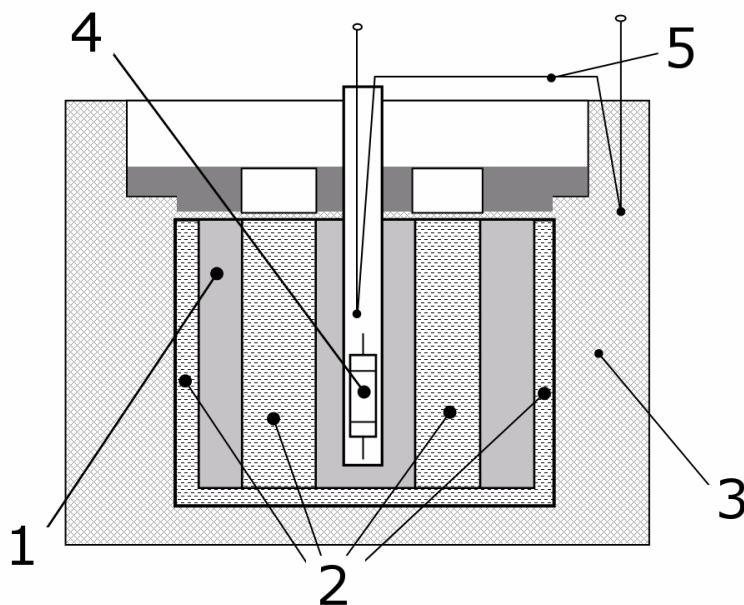


Рис. 1

Метод измерений ТФХ отличается от других известных тем, что сочетает в себе одновременно элементы двух методов: бикалориметра и микрокалориметра. Система «ампула – жидкость в зазоре» работает в режиме бикалориметра, система «ампула – жидкость в отверстиях» – в режиме микрокалориметра.

Контроллер является управляющим и вычислительным электронным устройством многофункционального назначения. С его помощью оператор устанавливает параметры образца (масса M), задает мощность нагревателя (изменяется от 0,1 до 6 Вт), устанавливает число измерений и интервал между ними. В процессе опыта контроллер самостоятельно регистрирует изменяющиеся во времени показания $\vartheta(\tau)$ температурного датчика, выводит их на жидкокристаллический индикатор и прекращает опыт, после чего по специальной программе производит автоматическую обработку собранного экспериментального массива данных и конечные результаты измерений выводит на индикатор. Контроллер по техническому заданию кафедры физики СПбГУНиПТ изготовлен ООО «ЛМТ» (СПбГУИТМО) [3].

В процессе опыта система «нагреватель – ампула – жидкость» разогревается под воздействием нагревателя, мощность которого задана и строго фиксирована. Показания термодатчика измеряются с постоянным временным интервалом (шагом), который задается оператором. На рис. 2 представлены экспериментальные зависимости $\vartheta(\tau)$, полученные в опытах с образцовыми жидкостями (толуол, дистиллированная вода). По этим зависимостям определяются темп m разогрева и стационарный температурный перепад Θ ампулы относительно температуры блока, которые используются при расчетах теплофизических характеристик исследуемых образцов.

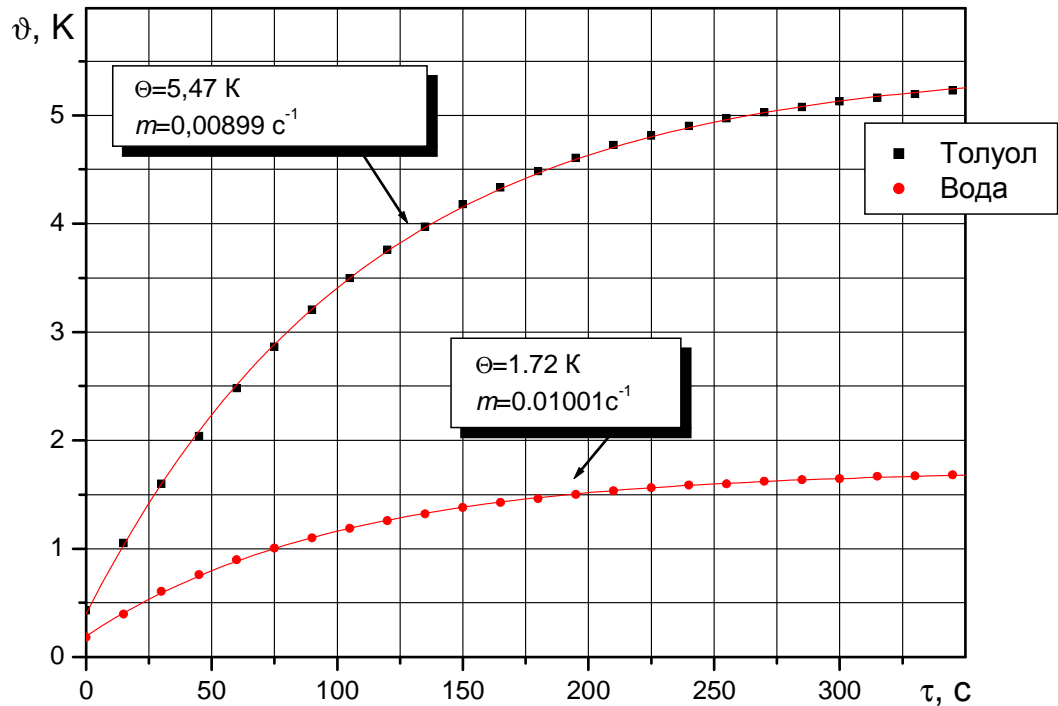


Рис. 2

Для расчета ТФХ жидких и пастообразных материалов использовались следующие расчетные соотношения [4]:

$$\lambda = \frac{\delta}{\bar{F}_{\text{заз}}} \left(\frac{W}{\Theta} - K_0 \right), \quad (1)$$

$$c = \frac{1}{M} \left[\frac{K_{\text{заз}}}{m} \frac{\chi p_{\text{отв}}}{\sin(\chi p_{\text{отв}})} - C_1 \right] \left[\frac{1}{\omega_{\text{заз}} \beta_{\text{заз}} + \omega_{\text{отв}} / \psi_{\text{отв}}} \right], \quad (2)$$

$$a = m (R_{\text{отв}} / p_{\text{отв}})^2, \quad (3)$$

где W – мощность нагревателя, K_0 – тепловая проводимость крепежных элементов между ампулой и блоком; $K_{\text{заз}} = \lambda (\bar{F}_{\text{заз}} / \delta)$ – тепловая проводимость образца в зазоре; $\chi = \delta / R_{\text{отв}}$; C_1 – теплоемкость ампулы; $\omega_{\text{заз}}$, $\omega_{\text{отв}}$ – объемные доли образца в зазоре и в отверстиях, соответственно; $\beta_{\text{заз}}$, $\psi_{\text{отв}}$ – поправки, учитывающие неравномерность температурного поля образца; $p_{\text{отв}}$ – безразмерный параметр для образца в отверстиях, который определяется с помощью следующих выражений:

$$\varphi(p_{\text{отв}}) = C_1 m / K_{\text{заз}}, \quad (4)$$

$$p_{\text{отв}}(\varphi) = 0,9976 + 0,003435\varphi - 0,4513\varphi^2 + 0,1763\varphi^3 - 0,1096\varphi^4. \quad (5)$$

В расчетные формулы (1)...(3) входят геометрические и тепловые константы ячейки. Для определения тепловых констант (K_0 и C_1) используются калибровочные опыты с хорошо изученным веществом.

Процедура измерения характеристик исследуемых образцов имеет ряд особенностей. Для проведения опыта ампула с нагревателем вставляется в

полость ячейки, во вспомогательный сосуд (металлическая или пластмассовая кювета) заливается исследуемая жидкость. Кювета взвешивается на аналитических весах с погрешностью не хуже ± 1 мг. С помощью шприца жидкость из кюветы заправляется в ампулу. Заполнение образца проводится до тех пор, пока уровень жидкости не достигнет верхней кромки ампулы. При этом необходимо обеспечивать отсутствие воздушных пузырьков в исследуемом образце. Затем кювета с остатками жидкости взвешивается, тем самым определяется масса образца, находящегося в ячейке. Для проведения опыта задается временной интервал (шаг) и общее число замеров (обычно 25). Для толуола интервал измерений обычно изменялся в пределах 15 – 20 с, а для воды 5 – 10 с. В процессе опытов температурный перегрев ампулы относительно блока не превышал 10 К. После окончания опыта контроллер по специально разработанной программе производит расчет ТФХ, полученный массив экспериментальных данных может быть передан на ПК.

При комнатной температуре коэффициент вязкости толуола и воды является небольшим, поэтому в опытах с ними было обнаружено влияние конвективной составляющей теплообмена. Прибор в этом случае измеряет эффективную теплопроводность. Для исключения конвективной составляющей был использован следующий способ измерений – с одним и тем же образцом проводилась серия опытов при разных значениях мощности нагревателя. В качестве примера на рис. 3 показаны результаты опыта с толуолом. По формуле (1) вычислялся коэффициент эффективной теплопроводности, как функция стационарного перегрева $\lambda_{эф}(\Theta_i)$. Строился график $\lambda_{эф}(\Theta_i)$ и по нему определялась сглаженная зависимость $\lambda_{эф}(\Theta) = \lambda_0 + K\Theta$ (сплошная линия на рис. 3). В этой зависимости постоянный член λ_0 по физическим соображениям соответствует значению молекулярной теплопроводности исследуемой жидкости.

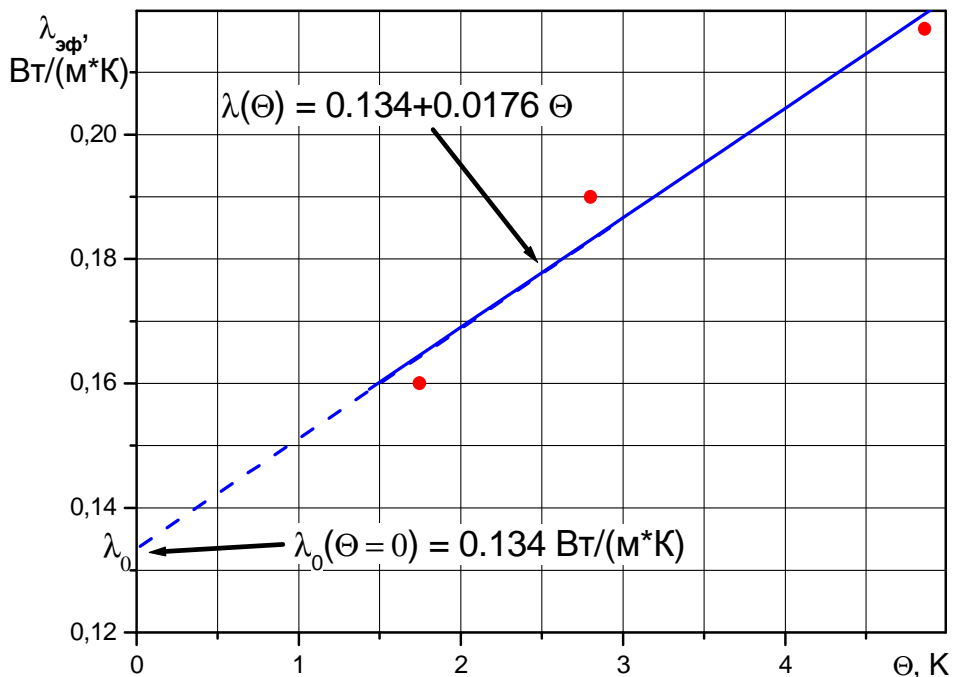


Рис. 3

Как видно из уравнения $\lambda_0 = 0,134 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$, а в справочной литературе [5] для толуола при $t = 20^\circ\text{С}$ значение теплопроводности $\lambda_0 = 0,135 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$. По результатам проведенных исследований удалось установить, что инструментальная погрешность прибора по теплопроводности и по удельной теплоемкости не превышает 5 %, а по температуропроводности — не более 7 %.

Список литературы.

1. Кондратьев Г. М., Дульнев Г. Н., Платунов Е. С., Ярышев Н. А. Прикладная физика: Теплообмен в приборостроении. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2003. 560 с.
2. 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., ил.
3. Баранов И. В., Платунов А. Е., Платунов Е. С. Комплекс автоматизированных приборов для измерения тепловых свойств. Научное приборостроение: СПб. 2003, т. 13, № 3, с. 19 – 24.
4. Баранов И. В. Теория, методы и средства комплексного исследования теплофизических свойств в режиме разогрева – охлаждения. Автореф. дис. д-ра техн. наук. СПбГУНиПТ, СПб, 2007.
5. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М., Физматгиз, 1963.