

Министерство образования РФ
Тамбовский государственный технический университет

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕПЛОЕМКОСТИ

Методические указания к лабораторным работам
для студентов второго курса специальностей 101600, 170500, 170600

Тамбов
• Издательство ТГТУ •
2003

УДК 621.1.016(076)
ББК 311я73-5
И 37

Утверждено Редакционно-издательским советом университета

Рецензент
Кандидат технических наук, доцент
В. И. Барсуков

И 37 Измерение теплоемкости: Метод. указания к лаб. работам / Сост.: В. И. Ляшков, В. А. Русин. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2003. 16 с.

Приводятся методические указания и порядок выполнения лабораторных работ, включая подробное описание экспериментальной установки, методики проведения экспериментов и обработки опытных данных. Дается список рекомендуемой литературы.

Предназначены для студентов 2 курса специальностей 101600, 170500, 170600.

УДК 621.1.016(076)

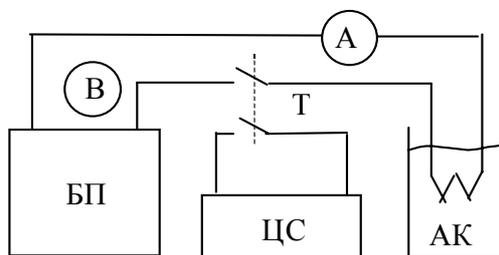
ББК 311я73-5

© Тамбовский государственный

технический университет (ТГТУ),

2003

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕПЛОЕМКОСТИ



Учебное издание

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕПЛОЕМКОСТИ

Методические указания к лабораторным работам

Составители:
ЛЯШКОВ Василий Игнатьевич,
РУСИН Владимир Александрович

Редактор Т. М. Глинкина

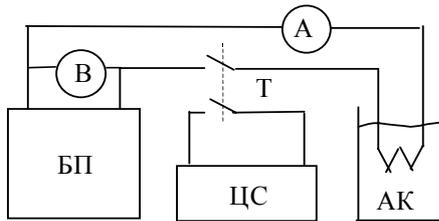
Компьютерное макетирование И. В. Евсеевой

Подписано к печати 21.03.2003
Гарнитура Times New Roman. Формат 60 × 84/16. Бумага газетная.
Печать офсетная. Объем: 0,93 усл. печ. л.; 0,9 уч.-изд. л.
Тираж 250 экз. С. 197

Издательско-полиграфический центр ТГТУ
392000, Тамбов, Советская, 106, к. 14

Измерить все, что измеримо
и сделать измеримым все,
что еще не поддается измерению.

Г. Галилей



1 ИЗМЕРЕНИЕ ТЕПЛОЕМКОСТИ ЖИДКОСТЕЙ

Цель работы: Освоить методику калориметрических измерений, опытным путем определить удельную теплоемкость жидкости.

Основы теории: Удельная теплоемкость – это одна из важнейших теплофизических характеристик вещества, знание кото-

рой совершенно необходимо при инженерных расчетах любых тепловых процессов. Особенности калориметрических измерений удельной теплоемкости приведены в учебной литературе [1] и специальных монографиях [2, 3].

Удельной теплоемкостью называют количество тепла, которое необходимо подвести к единице количества вещества, чтобы нагреть его на 1 градус. Поскольку количество вещества можно задавать его массой, объемом при нормальных условиях или числом киломолей, различают массовую, объемную и мольную теплоемкость. В соответствии с приведенным определением средняя массовая теплоемкость в процессах при $V = \text{const}$ выражается формулой:

$$c_{vm} = \frac{Q_{1-2}}{m(t_2 - t_1)}, \quad (1)$$

где Q_{1-2} – подведенное за процесс тепло, Дж; m – масса вещества, кг; t_1, t_2 – температуры в начале и конце процесса, К.

Если опытным путем определить все величины, стоящие в правой части формулы (1), то легко найти и значение c_{vm} , как результат косвенных измерений.

Обычно нагрев производится с помощью электронагревателя, и тогда количество подведенного тепла Q_{1-2} определяют по мощности электронагревателя и продолжительности его работы:

$$Q_{1-2} = U i \tau K_k, \quad (2)$$

где U – падение напряжения на нагревателе, В; i – ток в цепи, А; τ – продолжительность работы нагревателя, с; K_k – так называемая константа калориметра, показывающая, какая доля выделенного тепла пошла на нагрев исследуемого вещества. Величина $(1 - K_k)$ определяет долю тепла, израсходованного на разогрев деталей калориметра и на теплопотери в окружающую среду.

Количество вещества m определяют взвешиванием, температуры t_1 и t_2 – с помощью различного вида термометров.

Экспериментальная установка и методика экспериментов. Общая схема экспериментальной установки очень проста и приведена на рис. 1. От стабилизированного блока питания БП через двойной тумблер Т напряжение питания подается на электрический нагреватель адиабатического калориметра АК. Падение напряжения и ток в цепи измеряются соответственно вольтметром В и амперметром А. При включении нагревателя одновременно запускается в работу цифровой секундомер ЦС. И блок питания, и секундомер – промышленные приборы универсального назначения. Специальным устройством здесь является адиабатический калориметр постоянного объема, устройство которого показано на рис.

2.

Сосуд Дьюара *б* размещается в жестяном кожухе *9* на подставке *11*. Пространство между ними заполнено пластинами из пенопласта, чтобы уменьшить тепловые потери в окружающую среду. Сверху в сосуд вставляется крышка *5* из малотеплопроводного и в меру прочного материала. На крышке установлен микроэлектродвигатель *3* с мешалкой *10*, а также *3* электронагревателя *2* в герметичных стеклянных трубках. Там же закреплены терморезистор *7* и колодка *1* разъема электрических проводов. В отверстия крышки вставляются астатический термометр Бекмана *4* с ценой деления 0,01 К и лабораторный термометр *8* с ценой деления 0,1 К.

Экспериментальное исследование выполняется в следующей последовательности:

1 С помощью мерного цилиндра отмеряют 450 мл исследуемой жидкости, наливают ее в специальную колбу и взвешивают колбу на лабораторных весах ВЛК-500 с точностью до 0,01 г. Жидкость выливают

калориметр, взвешивают пустую колбу. Находят массу жидкости в калориметре

$$m_{\text{ж}} = m_1 - m_2 .$$

2 Устанавливают крышку калориметра, подключают электрические провода, вставляют термометры в соответствующие отверстия крышки. Включают блок питания. При этом начинает работать мешалка.

3 Тумблером включают электронагреватель, с помощью регуляторов БП устанавливают рабочее напряжение (25 ... 30 В) и прогревают жидкость до заданной температуры *t*, при которой планируется проводить измерения, наблюдая за ней по лабораторному термометру (обычно 35 ... 40 °С).

4 При достижении заданной температуры нагрев жидкости выключают. Осторожно вынимают термометр Бекмана, переворачивают его «вверх ногами» и переливают часть ртути в верхний резервуар (~ 40 ... 60 с). После чего термометр переворачивают в нормальное положение и резким встряхиванием разрывают ртутный столбик. Термометр устанавливают на место, наблюдая за его показаниями. Если в результате переливания он будет показывать 0,4 ... 0,9 К, то он готов к работе. Если его показания больше – нужно повторить переливание. Если показания термометра Бекмана приближаются к 0 К, но еще не достигли его, можно на время включить нагрев и подогнать показания до 0,3 ... 0,4 К.

5 Когда термометр Бекмана настроен, включают цифровой секундомер, устанавливают его показания на ноль. После выдержки в 2 ... 3 минуты начинается непосредственно калориметрический опыт. Он проводится группой из 2-х студентов. При этом один из них, наблюдая по стрелочному секундомеру, через каждые 25 с подает команду «Приготовиться», а через 30 с – команду «Замер». По этой команде другой студент – наблюдатель фиксирует и записывает в протокол измерений показания термометра Бекмана и другие измеряемые величины. В таком режиме (без включения нагревателя и цифрового секундомера) проводятся 5-6 измерений.

6 После 5-6 измерений включают нагрев (при этом включается и цифровой секундомер) и повторяют запись показаний термометра Бекмана через каждые 0,5 мин. Это продолжается до тех пор, пока температура в калориметре не увеличится примерно на 4 К, т.е. пока на термометре Бекмана ртутный столбик не поднимется до значений 4,40 ... 4,60 К. После этого выключают электронагреватель.

7 В том же режиме (через каждые 0,5 мин) продолжают записывать показания термометра Бекмана еще примерно 3 ... 3,5 минуты (6-7 измерений), заполняя протокол измерений.

8 В протокол измерений записывают показания лабораторного термометра и цифрового секундомера, после чего или выключают блок питания и секундомер, или готовят калориметр к измерениям при более высокой температуре *t*.

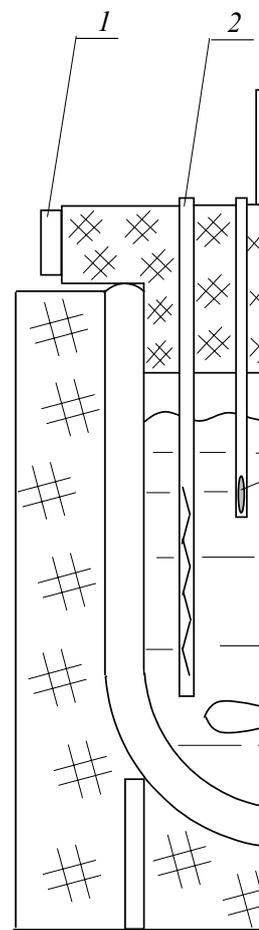


Рис. 2 Адиабатический калориметр

Протокол измерений (в качестве примера приведен заполненный по результатам одного из калибровочных опытов. Все калибровочные опыты проведены при участии студента гр. М-21 Ковалева С. В.).

Дата: 15.04.02.

Исследуемая жидкость: вода, объем $V_k = 450$ мл.

Масса заполненной колбы $m_1 = 496,27$ г.

Масса пустой колбы $m_k = 54,20$ г.

τ , мин	t_b , К	t , °С	U , дел	I , дел	Примечания
0,0	0,45	34,4	75		
0,5	0,44				
1,0	0,42				
1,5	0,41				
2,0	0,39				
2,5	0,38				
3,0	0,36		75,0	62,0	Вкл. нагрев
3,5	0,53				
4,0	0,84				
4,5	1,17				
5,0	1,49		75,0	62,0	
5,5	1,82				
6,0	2,14				
6,5	2,47				
7,0	2,79		75,0	62,0	
7,5	3,12				
8,0	3,44				
8,5	3,76				
9,0	4,08				
9,5	4,40				Выкл. нагрев
10,0	4,59				
10,5	4,58				$\tau = 394,959$ с
11,0	4,56				
11,5	4,54				$t_{B1} = 0,35$
12,0	4,52				$t_{B2} = 4,62$
12,5	4,50				
13,0	4,48	38,4			

Обработка результатов эксперимента

(приведен пример обработки одного из калибровочных опытов (опыт 2))

- 1 По результатам взвешивания определяем массу жидкости в калориметре:

$$m_{ж} = m_1 - m_k = 496,27 - 54,20 = 442,07 \text{ г.}$$

- 2 Рассчитываем среднюю температуру опыта (ее называют температурой отнесения):

$$t = 0,5 (t_n + t_k) = 0,5 (34,4 + 38,4) = 36,4 \text{ °С.}$$

- 3 По показаниям амперметра и вольтметра, зафиксированным в делениях шкалы, находим значе-

ния U_H и i_H :

$$U_H = \frac{30 \cdot U_{H\text{дел}}}{75} = \frac{30 \cdot 75}{75} = 30 \text{ В};$$

$$i_H = \frac{1 \cdot i_{H\text{дел}}}{75} = \frac{1 \cdot 62,0}{75} = 0,8267 \text{ А}.$$

4 Количество тепла, выделенное нагревателями за время нагрева:

$$Q_{1-2} = U_H i_H \tau = 30 \cdot 0,8267 \cdot 394,959 = 9795,38 \text{ Дж}.$$

5 Среднюю теплоемкость воды при t определяем по [4], линейно интерполируя следующие табличные данные:

$$t_1 = 30,0 \text{ }^\circ\text{C}, c_{p1} = 4,174 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$$

$$t_2 = 40,0 \text{ }^\circ\text{C}, c_{p2} = 4,174 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Тогда

$$C_{pr} = C_{pr1} + \frac{C_{pr2} - C_{pr1}}{t_2 - t_1} (t - t_1) =$$

$$= 4,174 + \frac{4,174 - 4,174}{40 - 30} (36,4 - 30) = 4,174 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

6 Опытную зависимость $t_b = f(\tau)$ представляем графически (рис. 3 и 4) и определяем относительные температуры в начале и конце нагрева $t_{Б1}$ и $t_{Б2}$ с учетом темпов охлаждения на предварительном и заключительном участках термограммы. Для этого через опытные точки проводим усред-

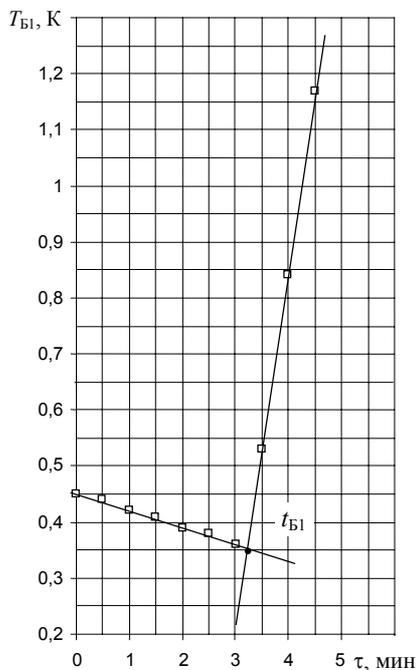


Рис. 3 Начальная стадия опыта при $t_{отн} = 36,4 \text{ }^\circ\text{C}$

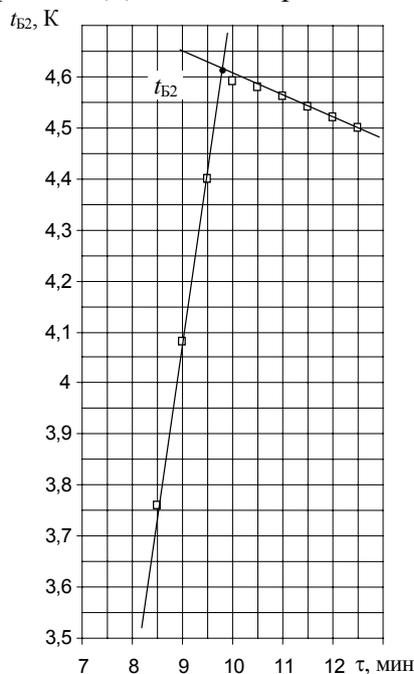


Рис. 4 Конечная стадия опыта при $t_{отн} = 36,4 \text{ }^\circ\text{C}$

редняющие прямые и значения температуры $t_{Б1}$ и $t_{Б2}$ находим по точкам пересечения этих прямых. Из рисунков находим $t_{Б1} = 0,35$ К; $t_{Б2} = 4,62$ К.

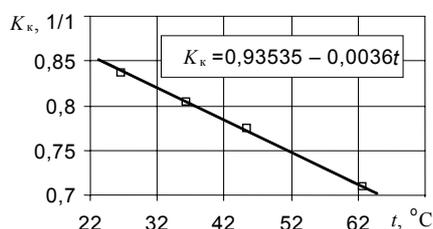
При калибровочных опытах из формулы (1) с учетом (2) находим значения константы калориметра

$$K_k = \frac{m_{ж} c_{пр} (t_{Б2} - t_{Б1})}{Q} = \frac{0,44207 \cdot 4174 \cdot (4,62 - 0,35)}{9795,38} = 0,804.$$

Серия аналогичных опытов позволила получить зависимость $K_k = f(t)$, представленную на рис. 5. С погрешностью, не превышающей 0,29 %, эта зависимость аппроксимирована линейной формулой

$$K_k = 0,93535 - 0,0036t.$$

При измерениях теплоемкости после определения значений $t_{Б1}$ и $t_{Б2}$ по приведенной формуле сначала рассчитываем значение константы калориметра K_k , а затем и среднюю теплоемкость жидкости по формуле:



$$c_{vm} = \frac{Q_{1-2} K_k}{m_{ж} (t_{Б2} - t_{Б1})}.$$

Анализ и выводы. Обычно в качестве исследуемых жидкостей в учебных целях используются такие, сведения о теплоемкости которых приведены в справочной литературе (трансформаторное мас-ло, масло МС-2 и т.п.). Представляет интерес сопоставить результаты проведенных измерений с табличными данными, вычислив

Рис. 5 Результаты калибровочных опытов с относительную погрешность

$$\delta c_{vm} = \frac{c_{vm}^{изм} - c_{vm}^{табл}}{c_{vm}^{табл}} \cdot 100, \%$$

Оценим предельную погрешность проведенных измерений, используя известную методику такой оценки [1].

Для формулы

$$c_{vm} = \frac{U i \tau K_k}{m_{ж} (t_{Б2} - t_{Б1})}$$

максимально возможная относительная ошибка определяется суммой абсолютных значений максимальных относительных ошибок сомножителей

$$\delta c_{vm}^{max} = |\delta U| + |\delta i| + |\delta \tau| + |\delta K_k| + |\delta m_{ж}| + |\delta (t_{Б2} - t_{Б1})|.$$

Оценим величину каждого слагаемого. На шкалах вольтметра и амперметра указан их класс точности: $\delta = 0,5$ %. Это означает, что такая относительная погрешность обеспечивается в том случае, когда стрелка прибора отклоняется на всю шкалу (75 делений). Абсолютная погрешность при этом будет $\Delta =$

$0,5/10075 = 0,375$ дел. Тогда при наших измерениях относительные погрешности будут:

$$\delta U = \frac{\Delta U_{\text{дел}}}{U_{\text{дел}}} \cdot 100 = \frac{0,375}{75} \cdot 100 = 0,5 \%,$$

$$\delta i = \frac{\Delta i_{\text{дел}}}{i_{\text{дел}}} \cdot 100 = \frac{0,375}{62} \cdot 100 = 0,604 \%.$$

Абсолютная погрешность цифрового секундомера составляет ± 1 последнего знака, так что относительная погрешность будет

$$\delta \tau = \frac{0,001}{394,959} \cdot 100 = 2,53 \cdot 10^{-4} \%.$$

Как уже отмечалось $\delta K_{\kappa} = 0,29 \%$. Абсолютная погрешность измерения массы составляет 0,02 г, значит, относительная погрешность будет

$$\delta m_{\text{ж}} = \frac{0,02}{442,07} \cdot 100 = 4,52 \cdot 10^{-3} \%.$$

Считается, что максимальная абсолютная погрешность определения температур $t_{\text{Б1}}$ и $t_{\text{Б2}}$ составляет 0,01 К, а разницы этих температур 0,02 К. Тогда относительная погрешность этой разницы будет

$$\delta(t_{\text{Б2}} - t_{\text{Б1}}) = \frac{0,02}{4,62 - 0,35} \cdot 100 = 0,468 \%.$$

Складываем полученные значения, находим

$$\delta c_{\text{vm}}^{\text{max}} = 0,5 + 0,604 + 2,5310^{-4} + 0,29 + 4,5210^{-3} + 0,468 = 1,86 \%.$$

В действительности отдельные погрешности могут иметь разные знаки и реальная ошибка может быть гораздо меньшей. При этом наиболее вероятной будет величина среднеквадратической ошибки

$$\begin{aligned} \delta c_{\text{vm}}^{\text{вер}} &= \sqrt{\frac{\delta U^2 + \delta i^2 + \delta \tau^2 + \delta K_{\kappa}^2 + \delta m^2 + \delta(t_{\text{Б1}} - t_{\text{Б2}})^2}{6}} = \\ &= \sqrt{\frac{0,5^2 + 0,604^2 + (2,53 \cdot 10^{-4})^2 + 0,29^2 + (4,52 \cdot 10^{-3})^2 + 0,468^2}{6}} = 0,391 \%. \end{aligned}$$

2 ИЗМЕРЕНИЕ ТЕПЛОЕМКОСТИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Измерение теплоемкости твердых тел проводится на той же экспериментальной установке и по методике, близкой с описанной ранее.

Для исследования изготавливают цилиндрический образец с размерами: наружный диаметр $d = 30$ мм, длина $l = 70$ мм. Если исследуемый материал плохо проводит тепло, по оси образца можно высверлить отверстие диаметром d от около 10 мм. Объем образца определяют по формуле

$$V_{об} = \frac{\pi(d^2 - d_{от}^2)}{4} l.$$

Чтобы получить $V_{об}$ в миллиметрах ($1 \text{ мл} = 1 \text{ см}^3$), размеры следует подставлять в сантиметрах.

Далее определяют объем заливаемой в калориметр жидкости из расчета, что суммарное заполнение колбы калориметра должно составлять 450 мл. Именно при таком заполнении при обработке опытных данных можно использовать приведенную ранее зависимость $K_k = f(t)$. Итак, находят необходимый объем для заполнения колбы

$$V_{ж} = 450 - V_{об}.$$

Объем $V_{ж}$ с помощью мерной мензурки отмеривают в специальную колбу и двойным взвешиванием (заполненную и после выливания жидкости в калориметр) определяют массу $m_{ж}$. Взвешивают образец, определяя $m_{об}$.

В качестве калориметрической жидкости выбирается такая, удельная теплоемкость которой хорошо известна и приведена в справочниках (обычно это дистиллированная вода).

Образец на нитке прикрепляется к пробке и через отверстие в крышке калориметра помещается в калориметрическую жидкость. Дальнейшие действия совершенно аналогичны предыдущей методике:

- включаем блок питания БП;
- включаем «нагрев» и выводим калориметр на заданную температуру t ;
- переливанием ртути из нижнего резервуара в верхний настраиваем термометр Бекмана;
- после непродолжительной выдержки начинаем замеры на предварительной стадии опыта (5-6 замеров с интервалом 30 с), заносим данные в протокол измерений;
- включаем нагрев, продолжая через каждые 30 с фиксировать показания термометра Бекмана;
- при нагреве на 3,5 ... 4 К выключаем нагрев и цифровой секундомер;
- через каждые 30 с фиксируем показания термометра Бекмана на заключительной стадии опыта.

Если образец имеет малую теплопроводность, стадия выравнивания температур жидкости и образца может затягиваться, поэтому делается несколько большее число замеров (10 ... 20, с интервалом 30 с). О стабилизации теплообмена может свидетельствовать постоянство темпа уменьшения температуры на этой стадии (рис. 6).

Обработка опытных данных проводится аналогично предыдущему. По термограмме определяют условные температуры начала и конца процесса разогрева t_n и t_k , определяют среднюю температуру опыта $t_{отн}$, количество выделенного тепла и значение константы калориметра при $t_{отн}$.

Однако теперь, учитывая, что в калориметре находятся два тела, уравнение теплового баланса будет записываться по-новому:

$$U\tau K_k = m_{ж}c_{рж}(t_k - t_n) +$$

$$+ m_{об}c_{об}(t_k - t_n),$$

откуда находим

$$c_{об} = \left[\frac{U\tau K_k}{t_k - t_n} - m_{ж}c_{рж} \right] \frac{1}{m_{об}}. \quad (3)$$

При проведении массовых измерений, когда к точности результатов не предъявляются повышенных требований, методика измерения теплоемкостей жидкостей и твердых тел может быть несколько упрощена. Упрощение это состоит в том, что для снятия термограмм используют более простые и менее точные приборы.

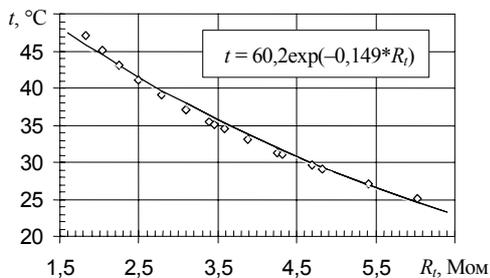


Рис. 8 Зависимости $t = f(R_t)$

погрешностью не более чем 2,62 %, усредняющая все опытные точки.

При упрощении методики в протокол измерений через каждые 30 с записывают показания прибора, измеряющего сопротивление терморезистора. В нашем случае для этой цели используется универсальный цифровой мультиметр В7-27. Далее величины R_t по приведенной формуле переводятся в градусы Цельсия, строится и обрабатывается термограмма, проводятся расчеты по формуле (3).

Дальнейшее упрощение можно получить, применяя для записи термограмм соответствующий самописец. Естественно, это облегчит опыт, но уменьшит точность измерений.

Увеличить точность и несколько упростить методику измерений позволяет другой метод, который называют методом калорифера. Суть его в том, что обмеренный и взвешенный образец нагревается до некоторой температуры t_0 в специальной печи или термостате, а потом быстро опускается в калориметр, заполненный известным количеством жидкости, теплоемкость и температура t_n которой известны. В результате теплообмена между образцом и жидкостью температура тел в калориметре увеличится до t_k .

Запишем тепловой баланс для описанного процесса теплообмена между образцом и жидкостью в калориметре:

$$m_o c_o(t_k - t_o)K_k = m_b c_b(t_k - t_n),$$

где m_o , c_o – масса и удельная теплоемкость образца; K_k – константа калориметра; m_b , c_b – масса и удельная теплоемкость воды в калориметре. Из приведенного соотношения находим формулу для расчета удельной теплоемкости образца

$$c_o = \frac{m_b c_b (t_k - t_n)}{m_o (t_k - t_o) K_k}. \quad (4)$$

Чтобы уменьшить погрешности опыта, изменение температуры в калориметре измеряют с помощью термометра Бекмана. При этом естественно

$$t_k = t_n + (t_{кБ} - t_{нБ}),$$

где $t_{кБ}$ и $t_{нБ}$ – показания термометра Бекмана в конце и в начале опыта (эти величины находятся по термограмме опыта так же, как это описано ранее); t_n – температура в калориметре в начале опыта, измеренная лабораторным термометром 8 (см. рис. 2).

В целом методика проведения экспериментов аналогична описанной выше за исключением начальной стадии опыта. Так, после измерений и взвешивания образца, его помещают в предварительно выведенный на температуру 50 °С термостат и выдерживают там не менее 10 минут для прогрева. После этого начинают через каждые 0,5 мин измерять температуру в калориметре термометром Бекмана, а через 5 – 7 таких замеров быстро переносят образец из термостата в калориметр. Измерения температуры термометром Бекмана ведутся до тех пор, пока она не перестанет увеличиваться, а уменьшение ее не станет менее 0,01 К за полуминут-

ный интервал.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Зубарев В. Н., Александров А. А. Практикум по технической термодинамике. М., 1971. 352 с.
- 2 Олейник Б. Н. Точная калориметрия. М., 1973. 208 с.
- 3 Исследование в области тепловых измерений / Под ред. Б. Н. Олейника. М., 1974.
- 4 Краснощеков Е. А., Сукомел А. С. Задачник по теплопередаче. М., 1980. 288 с.