



*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова*

**Физический факультет**

*Кафедра общей физики*

Лабораторный практикум по общей физике  
(молекулярная физика)

Лабораторная работа

**Измерение теплоёмкостей дифференциальным  
калориметром**

**Задача № 228**

Москва 2018

*Лабораторный практикум по общей физике (молекулярная физика)*

Н.Г. Ананьева, С.А. Киров, А.В. Козлов, А.М. Салецкий, Д.Э. Харабадзе

### **Измерение теплоёмкостей дифференциальным калориметром**

Учебное пособие – М.: ООП Физ. фак-та МГУ, 2018, 21 с.

Данная задача является результатом модернизации на основе новой элементной базы ранее существовавшей задачи общего физического практикума физического факультета МГУ

*П.С. Булкин, В.М. Захарцов, Г.А. Миронова, Т.И. Малова, Н.Г. Ананьева.*

### **"Измерение теплоёмкости жидкости дифференциальным калориметром"**

М.: ООП физ. ф-та МГУ, 2011 [1]).

## *Оглавление*

Введение .....	3
Экспериментальный метод и аппаратура .....	3
Дифференциальный калориметр .....	5
Теоретические основы метода .....	6
Калибровка установки .....	9
Эксперимент .....	11
Экспериментальная установка.....	11
Описание работы программы регистрации данных .....	14
Измерения .....	15
Проведение измерений .....	16
Упражнение 1. Калибровка калориметра .....	16
Упражнение 2. Измерение теплоёмкости образцов.....	17
Обработка и анализ эксперимента .....	19
Контрольные вопросы.....	19
Литература .....	20
Приложение .....	21

## ИЗМЕРЕНИЕ ТЕПЛОЁМКОСТЕЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫМ КАЛОРИМЕТРОМ

### *Цель работы*

Ознакомление с принципом работы дифференциального калориметра.

Измерение теплоемкости двух жидкостей

### *Идея экспериментального метода*

При нагревании двух калориметрических ячеек, происходящем за счет теплообмена с одним и тем же равномерно нагреваемым тепловым резервуаром, разность температур этих ячеек после переходного процесса устанавливается пропорциональной разности их полных теплоемкостей. Если поместить в одну из двух идентичных ячеек измеряемое вещество, и оставить другую пустой, то по установившейся разности их температур можно найти теплоемкость вещества. Метод требует измерения только температур.

## Введение

### Экспериментальный метод и аппаратура

Для проведения калориметрических измерений необходимо измерять с достаточной точностью количество подводимой (или отводимой) от вещества теплоты и регистрировать его температуру. Простейшая калориметрическая система состоит из калориметрической капсулы (используются также термины «ячейка») и внешней оболочки (рис.1). В капсулу помещают исследуемое вещество. Обычно туда же помещают и термометр (термопарный или полупроводниковый). Нагреватель может быть размещён или в капсуле, или во внешней оболочке, или вообще отсутствовать. В зависимости от метода измерения могут использоваться оболочки различного типа: с вакуумной термоизоляцией, с большой теплоёмкостью, с нагрева-

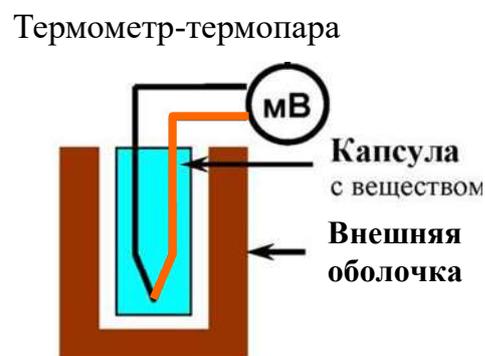


Рис.1 Блок-схема калориметра

телем и без него.

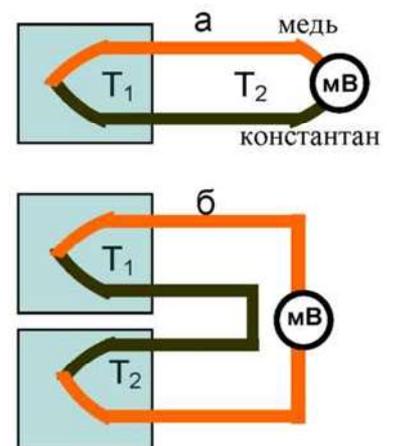
Капсулы обычно изготавливают из вещества с большой теплопроводностью и малой теплоёмкостью (из меди, серебра или алюминия). Это необходимо для уменьшения внутренних градиентов температуры (разницы температур в разных точках) и уменьшения теплоёмкости капсулы по сравнению с теплоёмкостью измеряемого образца.

Измерение температуры можно выполнить при помощи термопар. Термопарой является электрическая цепь, состоящая из двух проводников из разных материалов, например, часто используется пара металлов медь–константан (сплав Cu-Ni), соединённых, как показано на *рис.2*.

Работа выхода электронов в каждом из металлов различна, поэтому в месте соединения – спая – возникает контактная разность потенциалов, величина которой зависит от температуры спая. При одинаковой температуре обоих спаев ток по цепи не течёт: контактные разности потенциалов одинаковы по абсолютной величине и противоположны по знаку – они компенсируют друг друга. Но если нагреть один из спаев, то контактные разности потенциалов не компенсируют друг друга и по цепи течёт ток: в цепи появляется термо-ЭДС. Зависимость напряжения термо-ЭДС от температуры (в небольшом диапазоне температур) можно считать пропорциональной разности температур спаев  $T_1$  и  $T_2$ :

$$U = S(T_1 - T_2),$$

где  $S$  – коэффициент Зеебека (Т. Зеебек – немецкий физик, открыл в 1821 году термоэлектрический эффект). Термопара выдает ЭДС, пропорциональную разности температур между спаями, поэтому для измерения абсолютного значения температуры одного из спаев важно знать температуру второго спая.



*Рис. 2. Варианты подключения милливольтметра мВ к термопаре  
а - простейшая термопара,  
б - дифференциальная термопара.*

Основная недостаток термопар – малая величина термо-ЭДС: единицы – десятки мкВ/градус. Гораздо большие напряжения можно получить от полупроводниковых датчиков температуры, однако их рабочий диапазон гораздо уже, чем у термопар.

### **Дифференциальный калориметр**

При калориметрических измерениях возникает ряд проблем:

1 – исследуемое вещество помещается в сосуд – ячейку (особенно, если это жидкость или газ). Этот сосуд будет нагреваться вместе с веществом, значит, заберет часть теплоты на собственный нагрев.

2 – при нагревании сложно (невозможно) исключить потери тепла на нагрев окружающей среды.

Одним из способов учесть эти процессы является дифференциальный метод, реализованный в дифференциальном калориметре.

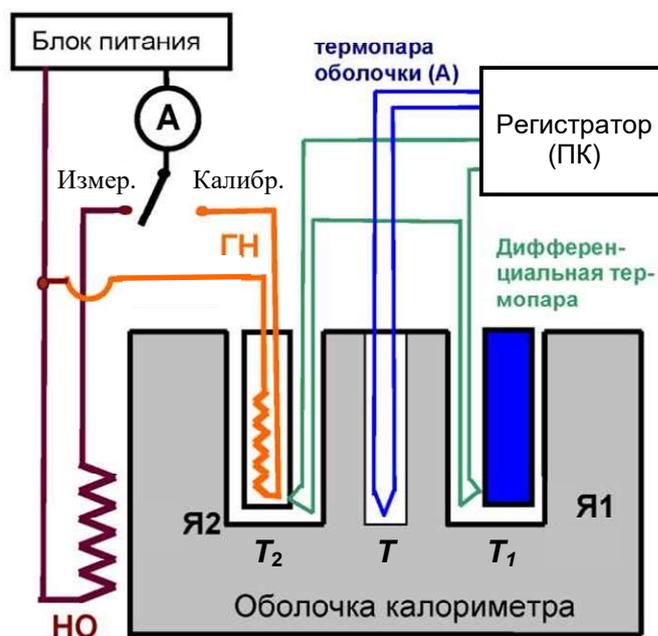
Принципиальная блок-схема дифференциального калориметра приведена на *рис.3*. В самом простом варианте он состоит из двух **идентичных** (с высокой точностью) калориметрических ячеек (Я1 и Я2) – тонкостенных латунных вертикальных трубок. В ячейку Я1 помещается исследуемое вещество, пустая ячейка Я2 является эталонной. Ячейки симметрично расположены в вертикальных цилиндрических полостях оболочки калориметра – массивного алюминиевого цилиндра с теплоемкостью, намного превышающей теплоемкость ячеек. На внешней поверхности оболочки проложен провод электрического нагревателя (НО – нагреватель оболочки). При его включении в цепь источника тока температура оболочки за время измерения растет медленно и, на первом этапе, почти линейно из-за ее большой теплоемкости.

Температура  $T_1$  и  $T_2$  ячеек Я1 и Я2 измеряется двумя одинаковыми термопарами. Спаи термопар прикреплены к внешним поверхностям калориметрических ячеек. Необходимую для данного метода измерений разность температур ячеек  $\theta = T_2 - T_1$  можно получить непосредственно, соединив термопары последовательно навстречу

друг другу, как показано на *рис.3* (дифференциальная термопара), или же вычитая отдельно измеренные температуры  $T_1$  и  $T_2$  программно при обработке в компьютере.

Для измерения температуры оболочки  $T$  служит термопара (А), один из спаев которой помещён в полость оболочки, а второй находится вне оболочки, при комнатной температуре  $T_0$ . Сигнал со всех термопар подается на регистрирующее устройство – самописец или компьютер, которое используется для запоминания и графического представления температур во время измерений.

Для калибровки установки имеется дополнительный градуировочный нагреватель (ГН), который во время градуировки помещается в эталонную ячейку 2. Он представляет собой пластмассовую трубку, на которую намотана никелевая проволока.



*Рис.3. Блок-схема установки с дифференциальным калориметром.*

### Теоретические основы метода

Теплообмен между капсулами и оболочкой (так же как и между любыми телами) может проходить за счет следующих процессов:

- 1) теплопроводность (между контактирующими телами и средами);
- 2) конвекция (в газах и жидкостях);
- 3) теплоизлучение

Вертикально расположенные цилиндрические капсулы не имеют непосредственного контакта с оболочкой и обмениваются с ней теплотой через узкие вертикальные воздушные промежутки между ними, в основном, за счет теплопроводности возду-

ха. Излучение здесь мало ввиду невысоких температур. Гравитационная конвекция также мала, поскольку зазор между ячейкой и оболочкой мал. Величину теплового потока между ячейкой и оболочкой за счет теплопроводности можно записать в виде:

$$\delta Q/dt = -\alpha(T_i - T), \quad (1)$$

где  $T_i$  – температура  $i$ -ой ячейки,  $T$  – температура оболочки  $\alpha$  – эмпирический коэффициент теплообмена, который зависит от площади тел, их формы, обработки поверхности и от материалов, из которых они сделаны.

Будем считать, что температура оболочки  $T$  медленно растет с постоянной скоростью

$$T(t) = T_0 + \beta t, \quad (2)$$

где  $T_0$  – начальная температура, равная комнатной. Поскольку ячейки нагреваются от оболочки практически независимо друг от друга, запишем уравнение теплообмена только для одной из них ( $i = 1, 2$ )

$$C_i \frac{dT_i}{dt} = -\alpha(T_i - T(t)), \quad (3)$$

где  $C_i$  – полная теплоемкость  $i$ -ой ячейки. Для решения данного уравнения введем новую переменную  $\theta_i(t) = T_i(t) - T(t)$ , т.е. отклонение температуры ячейки от температуры оболочки в момент времени  $t$ . Тогда уравнение (3) примет следующий вид

$$\frac{d\theta_i}{dt} + \frac{\alpha}{C_i} \theta_i = -\frac{dT}{dt}$$

или, с учетом (2)

$$\frac{d\theta_i}{dt} + \frac{1}{\tau_i} \theta_i = -\beta,$$

где  $\tau_i = C_i/\alpha$  – характерное время тепловой релаксации  $i$ -ой ячейки. Разделим переменные и проинтегрируем данное уравнение от начального состояния  $\theta_i = 0, t = 0$  до текущих значений  $\theta_i$  и  $t$ :

$$\int_0^{\theta_i} \frac{d\theta_i}{\theta_i + \tau_i \beta} = - \int_0^t \frac{dt}{\tau_i}.$$

В результате получаем

$$\theta_i = -\frac{\beta C_i}{\alpha} (1 - e^{-t/\tau_i}), \quad T_i = \theta_i + T = T_0 + \beta t - \frac{\beta C_i}{\alpha} (1 - e^{-t/\tau_i}).$$

В пределе при  $t \gg \tau_i$  получается

$$T_i(t, t \gg \tau_i) = T_0 + \beta t - \frac{\beta C_i}{\alpha}.$$

Таким образом, уже начиная со времени порядка  $t \geq (3...4)\tau$  температура ячейки начинает расти с той же скоростью  $dT_i / dt = \beta$ , что и температура оболочки, отставая от нее на постоянную величину  $-\beta C_i / \alpha$  (рис.4).

То же справедливо и для второй ячейки. Разность температур ячеек 1 и 2 будет при этом стремиться к постоянной величине

$$\theta_{12} = T_1 - T_2 = \frac{\beta}{\alpha} (C_1 - C_2).$$

Если сами ячейки идентичны, и в одной из них (например, первой) находится измеряемое вещество массы  $m$ , то  $C_1 - C_2 = mc$ , где  $c$

– удельная теплоемкость вещества. Поэтому, измерив скорость роста температуры  $\beta = dT/dt$  и установившуюся разность температур ячеек  $\theta_{12}$ , можно рассчитать теплоемкость вещества по формуле

$$c = \frac{\alpha}{m\beta} \theta_{12} = \frac{\alpha}{m(dT/dt)} \theta_{12}. \quad (4)$$

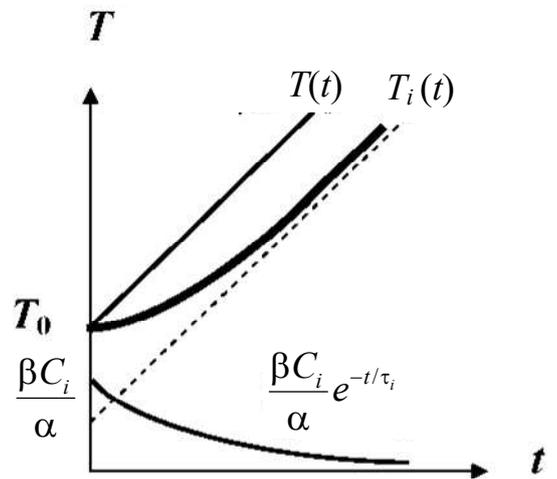


Рис.4  
Температура оболочки  $T$  и ячейки  $T_i$   
в зависимости от времени

### Калибровка установки

Для расчета теплоемкости по формуле (4) нужно знать коэффициент теплообмена  $\alpha$  между ячейкой и оболочкой, который является постоянным параметром конкретной установки. Чтобы его определить, в пустую ячейку (назовем ее эталонной) нужно вставить нагреватель известной мощности  $W$  и измерить зависимость температуры этой ячейки  $T_э$  от времени. Найдем теоретически эту зависимость.

В дифференциальном калориметре теплоемкость оболочки  $C_0$  много больше теплоемкости ячеек  $C$ . В процессе калибровки оболочка нагревается очень медленно, температура ее невелика, и потерями ее тепла в окружающую среду и на нагрев пустой ячейки 1 можно пренебречь. Запишем уравнения теплового баланса для ячейки и оболочки:

$$\text{ячейка:} \quad C'dT_э = Wdt - \alpha(T_э - T)dt, \quad (6a)$$

$$\text{оболочка:} \quad C_0dT = \alpha(T_э - T)dt. \quad (6б)$$

где  $C'$  – сумма теплоёмкости ячейки и теплоемкости градуировочного нагревателя,  $\alpha$  – коэффициент теплообмена,  $T$  – температура оболочки.

Введем новую переменную  $\theta$ , равную разности текущих температур ячейки и оболочки

$$\theta = T_э - T. \quad (7)$$

Поделив каждое из уравнений (6) на соответствующую теплоемкость и вычитая второе уравнение из первого, получаем уравнение

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{W}{C'} - \frac{\alpha}{C_0}\theta,$$

где  $\frac{1}{C'_0} = \frac{1}{C'} + \frac{1}{C_0} \approx \frac{1}{C'}$ , т.к.  $C_0 \gg C'$ .

Разделим переменные и проинтегрируем данное уравнение от начального состояния  $\theta(0) = 0, t = 0$  до текущих значений  $\theta$  и  $t$ :

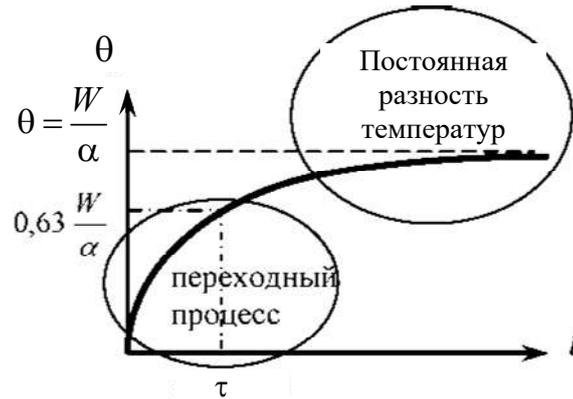


Рис.5. Изменение разности температур эталонной ячейки и оболочки ( $T_{\text{э}} - T$ ) в процессе ее нагрева при калибровке калориметра

$$\int_0^{\theta} \frac{d\theta}{\frac{\alpha}{C'}\theta - \frac{W}{C'}} = - \int_0^t dt.$$

Его решение имеет вид  $\theta(t) = \frac{W}{\alpha}(1 - e^{-t/\tau})$ ,

где  $\tau = C'/\alpha$  – время тепловой релаксации (рис.5). С течением времени при  $t \gg \tau$  устанавливается постоянная разность температур между ячейкой и оболочкой  $\theta \rightarrow \theta_{\text{к}} = W/\alpha$ . Измерив эту температуру, можно найти требуемый параметр теплообмена

$$\alpha = \frac{W}{\theta_{\text{к}}}.$$

Подставляя это выражение в (4), получаем окончательную формулу для расчета теплоемкости измеряемого вещества:

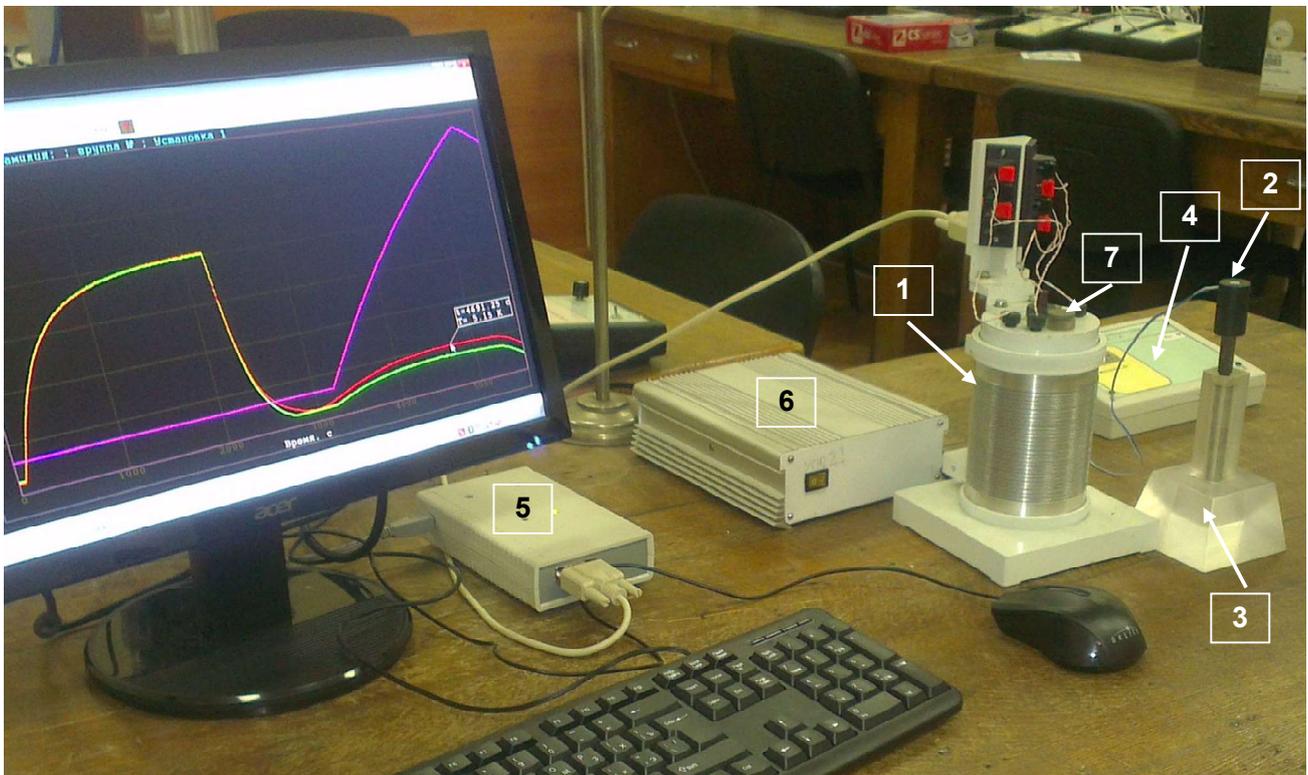
$$c = \frac{W}{\theta_{\text{к}}} \frac{\theta_{12}}{m(dT/dt)}. \quad (8)$$

где  $\theta_{12}$  – разность температур ячейки с измеряемым веществом и пустой эталонной ячейки. Очевидным преимуществом данного метода является то, что он требует только измерений температур и не нуждается в значениях теплоемкостей материалов установки и в измерении количеств теплоты.

## Эксперимент

### Экспериментальная установка

Внешний вид экспериментальной установки показан на *рис.6*. В нее входит модуль дифференциального калориметра (1), калибровочный нагреватель (2) на подставке (3), блок питания калибровочного нагревателя (4) с цифровым индикатором потребляемой мощности, блок сопряжения датчиков температуры с персональным компьютером (5), блок питания для нагрева калориметра (6) и персональный компьютер. Для измерения температуры используется полупроводниковые датчики.



*Рис.6* Общий вид экспериментальной установки

Модуль дифференциального калориметра в разобранном виде показан на *рис.7*. Все основные элементы закреплены на диэлектрической крышке калориметра. Данный калориметр содержит три идентичные медные калориметрические ячейки 1-3, симметрично расположенные относительно центра, из которых две ячейки (1, 2) служат для одновременного измерения теплоемкостей двух веществ (1 – вода, 2 –

глицерин) и одна пустая ячейка – эталонная (3). Ячейки 1-2 герметично закрыты завинчивающимися пробками. Массы залитых в них жидкостей приведены в файле справочных данных в компьютере и в самой программе регистрации и обработки данных. Эталонная ячейка 3 закрыта съемной резиновой пробкой.

К середине каждой ячейки приклеен датчик температуры. В центре крышки закреплен длинный пластмассовый цилиндр (4), на конце которого имеется медный диск, который, в собранном состоянии калориметра, касается своим концом дна оболочки. Датчик, расположенный у его конца, измеряет температуру дна оболочки. Провода всех четырех датчиков выведены через крышку и зажимаются в контактных зажимах (5), которые соединяются с разъемом DIN9 (6), от которого идет кабель на блок сопряжения с персональным компьютером.

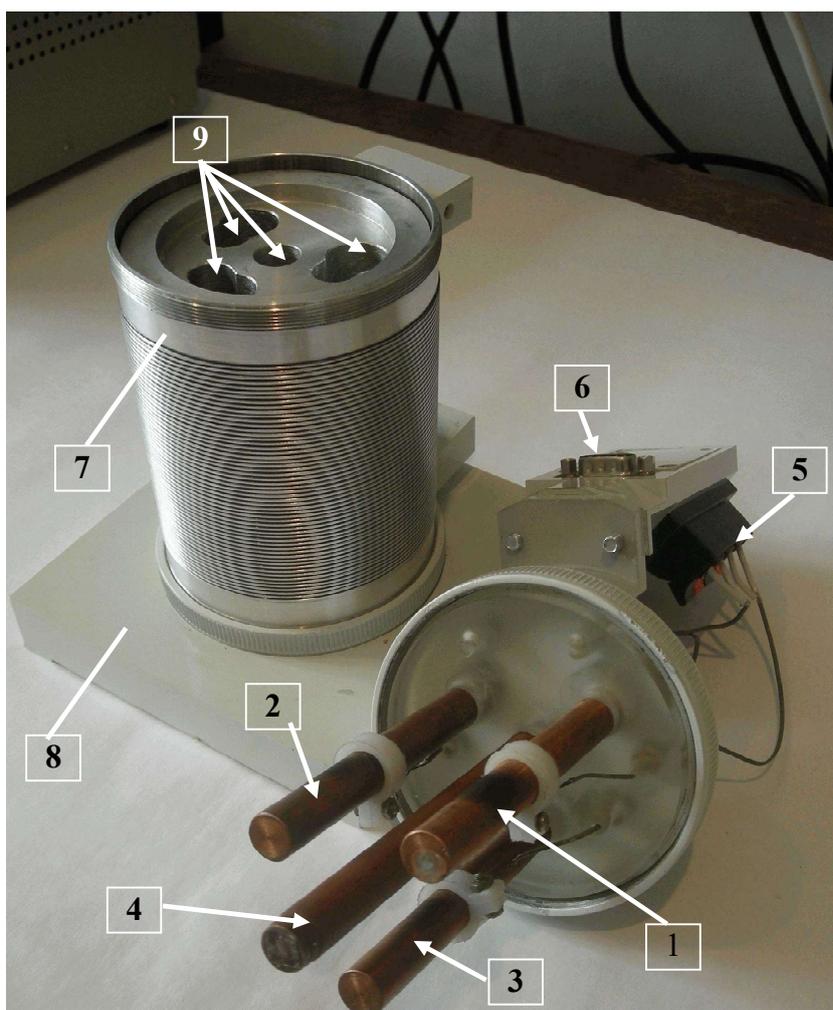


Рис.7 Дифференциальный калориметр в разобранном виде

Массивная оболочка (7) из алюминия закреплена на основании (8). Внутри оболочки сделаны каналы (9), куда вставляются цилиндрические калориметрические ячейки. На внешней поверхности оболочки имеются винтовые канавки, в которых проложен провод для нагрева оболочки. Эта обмотка выведена на разъем питания, находящийся сзади на подставке.

Блок сопряжения состоит из следующих компонентов (рис.8):

- Блок дифференциальных усилителей, формирующий разностные температурные сигналы  $T_3 - T_1$ ,  $T_3 - T_2$  и  $T - T_0$ , где  $T_1$  – температура ячейки с водой,  $T_2$  – температура ячейки с глицерином,  $T_3$  – температура эталонной ячейки,  $T$  – температура корпуса,  $T_0$  – температура окружающей среды.
- МикроЭВМ со встроенным аналого-цифровым преобразователем.

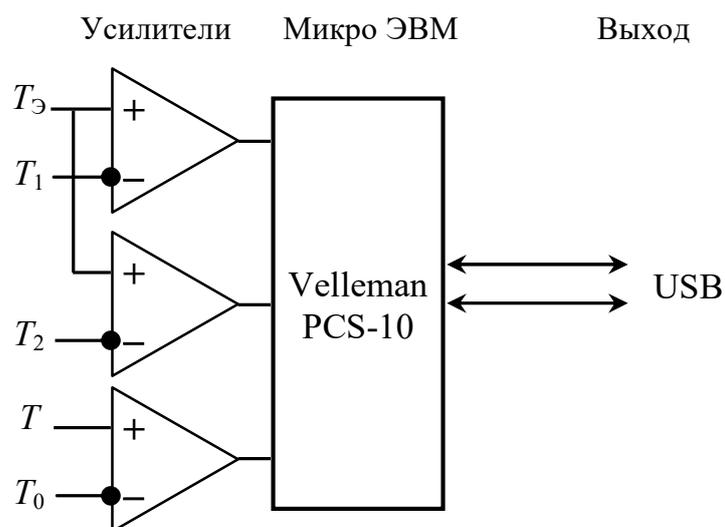


Рис.8. Схема блока сопряжения датчиков температуры с персональным компьютером

Питание блока сопряжения и соединение с персональным компьютером осуществляется через шину USB. В качестве МикроЭВМ использован промышленный блок сопряжения Velleman PCS-10.

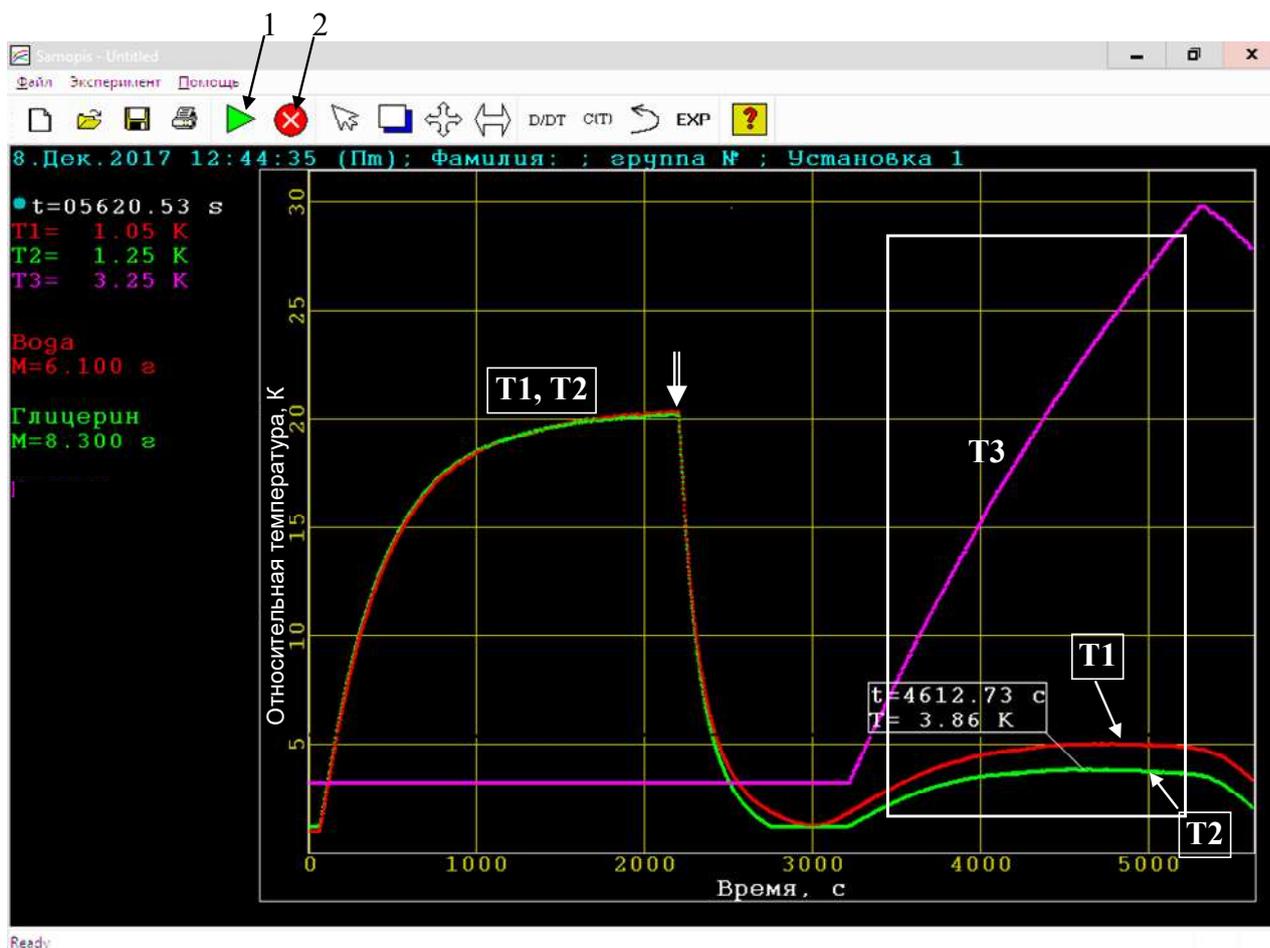


Рис.9 Рабочее поле программы и термограммы (T1-T3) за полный цикл измерений  
1 – кнопка запуска программы, 2 – кнопка останова

### Описание работы программы регистрации данных

Основное поле экрана занято координатной сеткой, на которой отображается измеряемая зависимость температурных сигналов соответствующих каналов (в Кельвинах), от времени (в секундах) (рис.9). Вверху находятся кнопки меню для выбора режима работы, в частности, для запуска программы (1) и ее останова (2). После нажатия на кнопку пуска 1 начинается построение термограмм всех трех каналов в режиме реального времени.

Термограммы отображаются на экране разными цветами в зависимости от номера канала.

В соответствии с рассмотренным выше методом измерения, на каналы 1 и 2 подается разностный сигнал  $T_1 = T_3 - T_1$  и  $T_2 = T_3 - T_2$ , где  $T_1$  и  $T_2$  – температуры ячеек 1 и 2,  $T_3$  – температура эталонной ячейки 3. Канал 3 показывает температуру оболочки относительно комнатной температуры  $T_3 = T - T_0$ . Ввиду особенности использованных дифференциальных усилителей с однополярным питанием, измерение температуры имеет "мертвые зоны" около нуля в интервале приблизительно 0-1,2 К для  $T_1$ ,  $T_2$ , и 0-3,2 К для  $T_3$ . Это не мешает измерениям, поскольку вне этих зон датчики откалиброваны так, чтобы показывать реальную температуру. Рабочие температуры установки лежат вне этих "мертвых зон".

В левой верхней части рабочего поля программы показаны теми же цветами текущие температуры с номером канала, название измеряемых веществ (вода, глицерин) и их массы.

## Измерения

### *Подготовка к работе*

1. Включите монитор и системный блок.
2. Перед загрузкой операционной системы появится меню выбора пользователя, в котором необходимо выбрать пункт «Студент».
3. После загрузки операционной системы автоматически запускается программа "Lab\_228". Если программа не запустилась, или для ее повторного запуска, нужно воспользоваться "иконкой" данной программы на рабочем столе.
4. После запуска программы на экране появляется диалоговое окно, в котором надо выбрать вариант «Начать новый эксперимент», после чего появляется окно с двумя текстовыми полями для ввода фамилии и имени выполняющего работу и номера студенческой группы. Эти поля обязательны для заполнения и в дальнейшем эта информация будет распечатана вместе с результатами, представляемыми преподавателю после выполнения работы и при ее сдаче. После подтверждения введенных данных кнопкой ОК на экране появляется основное окно программы.

## Проведение измерений

### Упражнение 1. Калибровка калориметра

Цель калибровки – определить коэффициент  $\alpha$  теплоотдачи калориметрической ячейки. Согласно 7, в данном случае надо измерять разность температур эталонной ячейки и оболочки  $\theta = T_3 - T$ . Реально измеряются  $T_1 = T_3 - T_1$  и  $T_2 = T_3 - T_2$ . Это не приводит к заметным ошибкам, т.к. температуры ячеек  $T_1, T_2$  совпадают с температурой оболочки  $T$ .

1. Откройте эталонную ячейку в блоке калориметра, вынув пробку 7 (рис.6). Осторожно, чтобы не повредить внешнюю поверхность калибровочного нагревателя 2, выньте его из подставки 3 и поместите в эту ячейку (см. рис.6).
2. Подключите провод от калибровочного нагревателя к источнику питания нагревателя 4 и включите его.
3. Запустите режим регистрации данных, нажав зеленую треугольную кнопку 1  в меню программы (рис.9).
4. Поскольку эталонная ячейка нагревается, а температуры ячеек 1 и 2 равны температуре оболочки, показания температурных каналов T1 и T2 начнут синхронно возрастать (рис.9). При достижении эталонной ячейкой стационарной температуры (этот момент показан стрелкой) необходимо записать эту температуру и значения мощности, которое показывает индикатор блока питания.
5. После этого **выключите источник питания**, осторожно извлеките нагреватель из ячейки и вставьте его в держатель. На этом градуировка заканчивается.

Прежде, чем приступить к упражнению 2, следует дождаться, пока показания каналов T1-T3 вернуться к нулю (это занимает 13-15 мин). Работу самой программы при этом можно не останавливать. Если ее все же остановить красной кнопкой 2 , то

перед началом следующего упражнения работу нужно возобновить, нажав кнопку старт 1 . Предыдущие результаты при этом не пропадут.

## Упражнение 2. Измерение теплоёмкости образцов

1. Перед началом эксперимента нужно закрыть пробкой эталонную ячейку 7, чтобы в процессе измерений из нее не было конвекционного потока тепла наружу.
2. Включите второй блок питания, предназначенный для нагрева оболочки (6 на *рис.6*). Термограмма канала T3, показывающая температуру оболочки  $T$  относительно комнатной температуры, начнет почти линейно возрастать. Термограммы каналов T1 и T2, показывающие разности температур эталонной ячейки и ячеек 1,2 – также будут возрастать, потому что ячейки 1 и 2, заполненные измеряемыми веществами, нагреваются медленнее, чем пустая эталонная ячейка.
3. После достижения термограммами каналов T1 и T2 постоянных значений (т.е. их выхода на горизонтальный участок) выключите источник питания (для примера на *рис.9* это время около 4800 с). После этого остановите регистрацию данных, нажав красную кнопку 2  в меню программы (*рис.9*).
4. С помощью перемещаемого мышью экранного курсора-индикатора текущих координат измерьте по экрану и запишите для каналов T1 и T2 их максимальные температуры. Для увеличения точности установки курсора увеличьте в этой области масштаб диаграммы, вращая колесо мыши.
5. Распечатайте на принтере экран с термограммами. Печать можно выполнить и потом, если сохранить окно программы в формате pdf, или выполнить захват (capture) активного окна в графический файл с помощью имеющейся программы XnView (**Tools→capture screen**).
6. Измерьте производную  $dT_3/dt$  графика T3. Поскольку зависимость  $T_3(t)$  не совсем линейна, измерение ее наклона надо выполнить именно при том же

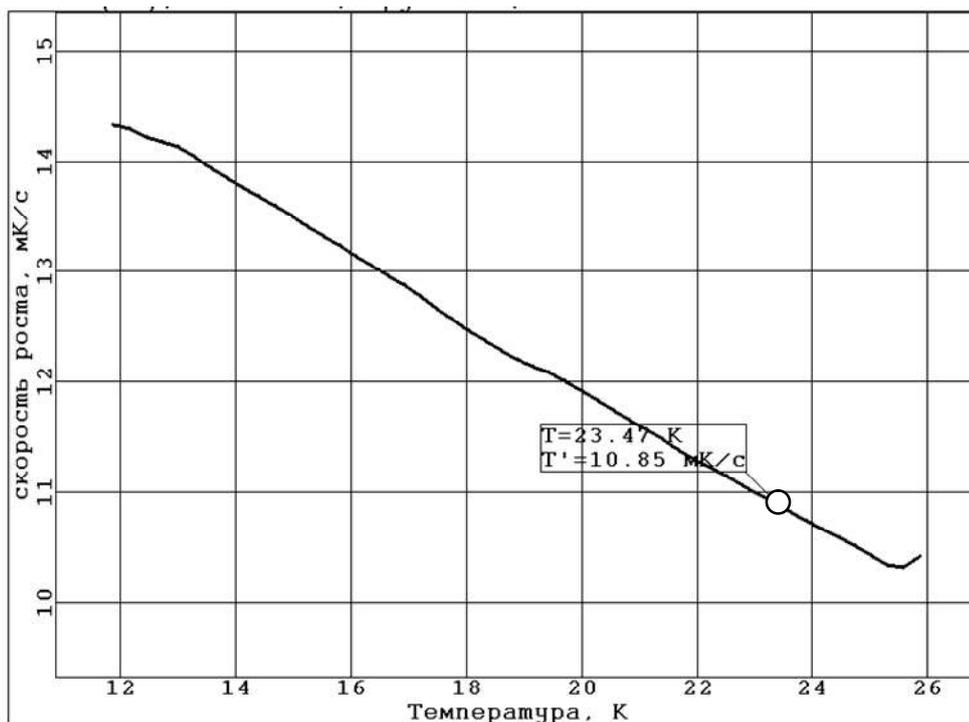


Рис.10 Расчет производной  $dT_3/dt$ . Табличка курсора показывает ее значение  $T'$  в точке  $T = 23,47 \text{ К}$ .

значении  $T_3$ , при которой  $T_1$  и  $T_2$  своих достигли максимальных значений, в показанном на рис.9 случае это  $T_3 = 23,5 \text{ К}$ . Это можно сделать "вручную", измерив с помощью координатного курсора начальные и конечные координаты отрезка графика около этой температуры и рассчитав тангенс наклона  $\Delta(T_3)/\Delta t$  в данном интервале.

Более точно производную можно найти с помощью встроенной функции численного дифференцирования. Для этого нажмите в панели инструментов кнопку выделения , выделите прямоугольную область в нужном интервале  $T_3$  (белая рамка на рис.9), после чего нажмите программную кнопку  $D/DT$ . На экране появится график  $d(T_3)/dt$  в зависимости от  $T_3$  (рис.10). Запишите величину этой производной при температуре, соответствующей времени измерения температур  $T_1$  и  $T_2$ . Распечатайте этот график на принтере.

## Обработка и анализ эксперимента

1. Разместите в отчет по задаче графики, распечатанные в соответствии с п.п. 5, 6).
2. Вычислите параметр теплообмена ячейки с оболочкой  $\alpha$ .
3. Вычислите теплоёмкости измеряемых жидкостей по формуле (7).
4. Оцените погрешность результата, учитывая погрешности измерений температур на экране монитора.

Объясните влияние следующих факторов, которые могут быть причиной погрешностей:

- неидентичность калориметрических ячеек,
- отличие процессов теплообмена ячеек при градуировке и в рабочем режиме,
- нестационарность и неоднородность температурных полей в калориметрических ячейках.

## Контрольные вопросы

- Что такое теплоёмкость вещества, какова размерность удельной и молярной теплоёмкости?
- Почему ячейки калориметра выполняются из серебра, меди (или ее сплава латуни), алюминия, а не из стекла или фарфора?
- Привести примеры разных типов теплообмена и указать их основные особенности.
- От чего зависит коэффициент теплообмена?
- Почему в данной задаче можно пренебречь излучением и конвекцией?
- Вывести уравнение, определяющее нагрев калориметрической ячейки от нагревающейся оболочки в течение рабочего хода калориметра и найти его решение.

- Вывести уравнение теплообмена калориметрической ячейки и оболочки при калибровке калориметра и найти его решение.

### Литература

1. Булкин П.С., Попова И.И. Общий физический практикум. Молекулярная физика. Учебное пособие. М.: Изд-во Московского ун-та, 1988. С. 27-38.
2. Сивухин Д. В. Общий курс физики том II. Термодинамика и молекулярная физика. Спб, М.: Физматлит , 2005, §18.
3. Матвеев А.Н. Молекулярная физика. Спб, Лань, 2010 С. §17.
4. Миронова Г.А., Брандт Н.Н., Салецкий А.М. Молекулярная физика и термодинамика в вопросах и задачах. М.: Изд-во Московского ун-та, 2010.

## Приложение

### *Теплоёмкость и плотность некоторых жидкостей*

<b>Вещество</b>	<b><math>c_p</math>, кДж/(кг·К)</b>	<b><math>\rho</math>, <math>10^3</math> кг/м<sup>3</sup></b>
Ацетон	2,22	0,791
Бензин	2,09	0,68 - 0,72
Вода чистая 0 °С	4,218	0,99987
20 °С	4,182	0,99823
40 °С	4,178	0,99224
60 °С	4,184	0,98824
80 °С	4,196	0,97183
Глицерин	2,43	1,26
Ртуть	0,138	13,55
Спирт метиловый	2,47	0,792
Спирт этиловый	2,4	0,79