

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЁВА  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»**

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ  
УДЕЛЬНОЙ ТЕПЛОЕМКОСТИ  
ТВЕРДЫХ ТЕЛ**

**САМАРА 2012**

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЁВА  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ ТЕПЛОЕМКОСТИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

*Утверждено Редакционно-издательским советом университета  
в качестве методических указаний к лабораторной работе № 1-23*

САМАРА  
Издательство СГАУ  
2012

УДК 53(075)  
ББК 22.313

Составители: *Н.М.Рогачев, С.И. Гусева*

Рецензент В.В. Б и р ю к, доктор технических наук, профессор  
кафедры «Теплотехника и тепловые двигатели»

**Определение удельной теплоемкости твердых тел:** Метод. указания к лабор. работе №1-23/ *Сост.: Н.М. Рогачев, С.И. Гусева.* – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2012. – 14 с.

Содержат методические и инструктивные материалы для выполнения лабораторной работы по исследованию теплоемкости твердых тел.

Приводятся: краткая теория, знакомящая с методом измерения удельной теплоемкости тела; описание экспериментальной установки; порядок выполнения практической части; методика обработки полученных результатов; контрольные вопросы; список рекомендуемой литературы.

УДК 53(075)  
ББК 22.313

## Лабораторная работа № 1-23

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ ТЕПЛОЕМКОСТИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

*Цель работы:* проверка выполнимости закона Дюлонга и Пти для ряда исследуемых веществ.

*Приборы и принадлежности:* лабораторная установка ФПТ 1-8, технические весы.

#### 1. ВВОДНАЯ ЧАСТЬ

*Удельной теплоемкостью* называется физическая величина, равная количеству теплоты, которое нужно сообщить единице массы  $1$  кг вещества для увеличения его температуры на  $1$  К:

$$c = dQ / (m \cdot dT), \quad (1)$$

где  $c$  – удельная теплоемкость,  $dQ$  – количество сообщенной теплоты,  $dT$  – изменение температуры,  $m$  – масса вещества. Удельная теплоемкость измеряется в джоулях на килограмм-кельвин ( $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ ).

*Молярной теплоемкостью* называется физическая величина  $c_m$ , равная отношению количества теплоты, полученного веществом, к числу молей этого вещества и изменению его температуры:

$$c_m = dQ / (m \cdot dT/\mu), \quad (2)$$

где  $\mu$  – молярная масса вещества. Единица молярной теплоемкости – джоуль на моль-кельвин ( $\text{Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$ ).

Большинство твердых тел имеет кристаллическое строение. В узлах кристаллической решетки располагаются молекулы, атомы или ионы. У металлов узлы кристаллической решетки заполнены положительно заряженными ионами. Между ионами беспорядочно, по-

добно молекулам газа, движутся электроны, отщепившиеся от атомов при образовании кристалла. Эти электроны удерживаются вместе положительно заряженными ионами, иначе решетка распалась бы под действием кулоновских сил отталкивания, возникающих между ионами. Вместе с тем и электроны удерживаются ионами в пределах кристаллической решетки.

Ионы в кристаллической решетке совершают тепловые колебания около фиксированных положений равновесия. Характер этих колебаний весьма сложен. В упрощенной модели колеблющаяся частица взаимодействует с соседними частицами, т. е. колебания передаются от одной частицы к другой и распространяются в кристалле в виде упругих тепловых волн.

Вследствие того, что коэффициент объемного расширения твердых тел при комнатной температуре мал, различие между теплоемкостями при постоянном давлении и постоянном объеме невелико. Поэтому общее выражение теплоемкости твердого тела совпадает со значением молярной теплоемкости при  $V = const$ :

$$c_m = dU / dT, \quad (3)$$

где  $dU$  – изменение внутренней энергии тела, являющейся суммой кинетической энергии колебательного движения частиц, находящихся в узлах кристаллической решетки, и потенциальной энергии их взаимодействия;  $dT$  – изменение температуры;  $V$  – объем тела.

Полная энергия  $U$  колеблющейся частицы равна:

$$U = E_k + E_p. \quad (4)$$

Так как средняя кинетическая энергия  $\langle E_k \rangle$  равна средней потенциальной энергии  $\langle E_p \rangle$ , то среднее значение полной энергии частицы

$$\langle U \rangle = 2\langle E_k \rangle = kT, \quad (5)$$

где  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – температура.

При написании уравнения (5) использовалась *теорема о равномерном распределении энергии по степеням свободы*. Согласно этой теореме энергия, приходящая на одну степень свободы, равна  $kT/2$ . Под *числом степеней свободы* понимается число независимых параметров, определяющих положение тела в пространстве. Колеба-

тельная степень свободы частиц обладает удвоенной энергетической емкостью: на каждую колебательную степень свободы приходится в среднем две половинки  $kT$  – одна в виде кинетической и одна в виде потенциальной энергии. Поэтому правая часть в уравнении (5) принимается равной  $kT$ . Если твердое тело рассматривать как систему, состоящую из  $N$  свободных частиц, то в трехмерном пространстве оно имеет  $3N$  степеней свободы и поэтому согласно выражению (5) обладает энергией

$$U = \langle U \rangle = 3 N k T = 3 R T, \quad (6)$$

где  $R = k T$  – универсальная газовая постоянная.

Из формул (3) – (6) следует закон Дюлонга и Пти: *при не слишком низких температурах молярная теплоемкость химически простых веществ, находящихся в кристаллическом состоянии, одинакова и равна:  $c_m = 3R$ .*

Подставляя численное значение универсальной газовой постоянной, для молярной теплоемкости твердого кристаллического тела получим:

$$c_m = 25 \text{ Дж}/(\text{моль } K). \quad (7)$$

Это равенство довольно хорошо выполняется для многих веществ при комнатной температуре. Для тел, охлажденных до очень низких температур, наблюдается отклонение от закона Дюлонга и Пти. Вблизи абсолютного нуля молярная теплоемкость всех тел пропорциональна  $T^3$ . Более строгая теория теплоемкости твердых тел разработана Эйнштейном и Дебаем.

Удельная  $c$  и молярная  $c_m$  теплоемкости связаны соотношением:

$$c = c_m / \mu. \quad (8)$$

Для одноатомных веществ, какими являются исследуемые металлы, молярная и атомная массы совпадают. Таким образом, определив по таблице элементов Д.И.Менделеева молярную массу вещества, с помощью закона Дюлонга и Пти, можно рассчитать его удельную теплоемкость.

## 2. СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

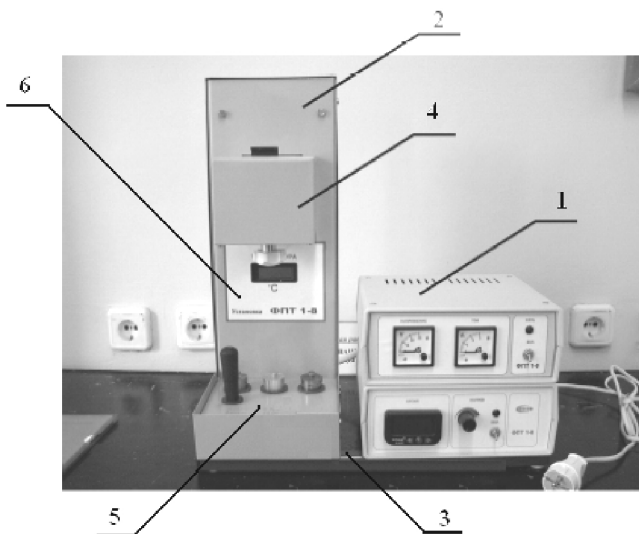


Рис. 1

Для определения удельной теплоемкости различных веществ в работе используется экспериментальная установка ФПТ1-8, состоящая из трех основных частей (рис.1): 1 – приборный блок БП-8; 2 – блок рабочего элемента РЭ-8; 3 – стойка. Внутри приборного блока находится печатная плата с радиоэлементами и системы регулирования параметров. На лицевой панели блока установлен цифровой контроллер для измерения времени, амперметр, вольтметр, тумблеры, ручки управления и регулирования установки.

Визуально приборный блок разделен на три узла: 1) узел «Измерение»; 2) узел «Нагрев»; 3) узел «Сеть».

Узел «Сеть» осуществляет подключение установки к электрической сети переменного тока напряжением 220 В.

Через узел «Нагрев» производится включение и регулирование нагрева калориметра.

Узел «Измерение» состоит из контроллера для измерения времени, амперметра, вольтметра и осуществляет замер величин тока, напряжения и времени нагрева.

В приборном блоке БП-8 размещается калориметр, схема которого показана на рис. 2. Калориметр представляет собой металлический корпус 1 с конической полостью 2, куда вставляются образцы 3, изготовленные из исследуемых материалов и представляющие собой конические цилиндры, притертые к полости в корпусе калориметра. В калориметре уложена нагревательная спираль 4. Корпус калориметра помещен в цилиндрический стакан 5, изготовленный из текстолита, и снаружи покрыт металлическим кожухом 6. После помещения в калориметр испытуемого образца он закрывается крышкой 7. Винт 9 предназначен для удаления образцов из калориметра после окончания опытов. Для этой же цели можно использовать головки образцов 8.

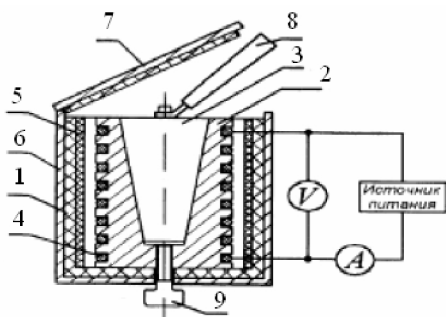


Рис. 2

В лабораторной установке для определения удельной теплоемкости используются образцы, изготовленные из металлов: сталь 3, дюралюминий Д16, латунь А63.

Если нагреть на  $\Delta t$  °С калориметр с размещенным в нем исследуемым образцом, то энергия электрического тока пойдет на нагревание образца и калориметра. По закону сохранения энергии можно записать:

$$I U \tau_1 = m_k c_k \Delta t + m_t c_t \Delta t + \delta, \quad (9)$$

где  $I$  и  $U$  – ток и напряжение на нагревателе,  $\tau_1$  – время нагревания,  $m_k$  и  $m_t$  – массы калориметра и нагреваемого образца,  $c_k$  и  $c_t$  – удельные теплоемкости калориметра и образца,  $\delta$  – потери тепла.



Для того, чтобы вычислить и исключить из уравнения (9) тепло, идущее на нагрев калориметра, и потери тепла в окружающее пространство, можно нагреть пустой калориметр на те же  $\Delta t$  °С. Потери тепла в обоих случаях будут одинаковыми, так как они зависят только от разности температур  $\Delta t$ , но этот процесс потребует меньшего времени нагревания  $\tau_2$ :

$$IU\tau_2 = m_k c_k \Delta t + \delta. \quad (10)$$

Из уравнений (9), (10) находится удельная теплоемкость исследуемого образца:

$$c_t = IU \Delta\tau / (m_t \Delta t), \quad (11)$$

где  $\Delta\tau = \tau_1 - \tau_2$ . Значение  $\Delta\tau$  можно определить по графикам зависимости  $\Delta t$  от  $\tau$  для пустого калориметра и калориметра с исследуемым образцом, как это сделано на рис.3.

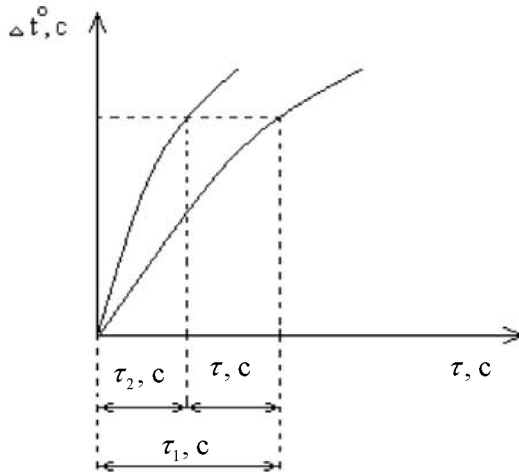


Рис. 3

### 3. ПРОВЕДЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ

1. Открыть калориметр и выдержать некоторое время, чтобы температура внутри калориметра сравнялась с комнатной температурой.

2. Определить массы испытуемых образцов, взвесив их на весах. Значения масс записать в таблицу.

3. Измерить по ртутному термометру комнатную температуру.

4. Вывести на минимум (влево) ручки потенциометров. Включить тумблер «Вкл» в модуле питания «Сеть». При этом загорится сигнальная лампочка.

5. Снять экран с блока РЭ-8 и одеть его на специальные винты с задней стороны блока РЭ-8.

6. Загрузить исследуемый образец в калориметр, плотно закрыв его крышку.

7. Включить тумблер «Вкл» в модуле «Нагрев». При этом загорится сигнальная лампочка. Регулятором мощности установить мощность нагрева порядка 100 Вт.

8. Включить секундомер, нажав кнопку «D – Старт».

9. По цифровому контроллеру определить начальную температуру калориметра.

*Внимание! При проведении опытов следите, чтобы мощность нагревателя не менялась.*

10. Произвести нагрев калориметра с алюминиевым образцом на  $\Delta t = 40$  °С. (температура в калориметре равна комнатной температуре плюс 40 °С). В процессе нагрева через каждые 10 °С фиксировать по секундомеру время нагрева  $t$ . Данные занести в таблицу.

11. Снять показания силы тока  $I$  и напряжения  $U$  и занести их в таблицу 1.

12. Выключить тумблер в модуле «Нагрев», нажать кнопку секундомера «D – Стоп». Удалить алюминиевый образец из калориметра. Охладить калориметр до комнатной температуры. Для быстрого охлаждения следует открыть крышку калориметра и поместить в него холодный образец. Температура начнет понижаться. Когда темп охлаждения снизится, нагретый образец вынуть из калориметра и вместо него вложить следующий (холодный) образец. Для удаления образца из калориметра надо повернуть по часовой стрелке винт перемещения образца 9 (см. рис. 2), расположенный в нижней части калориметра, после чего вынуть образец рукояткой.

13. По секундомеру определить время нагрева  $\tau_1$ . Значение  $\tau_1$  занести в таблицу. Нажать кнопку «S-сброс» показаний секундомера.

14. После достижения комнатной температуры в калориметре закрыть его крышку и повторить пункты 8-12, нагревая калориметр без образца.

15. Определить время нагрева пустого калориметра  $\tau_2$ . Значение  $\tau_2$  занести в таблицу.

16. По данным таблицы построить график зависимости  $\Delta t$  от времени  $\tau$  по типу рис. 3. Найти по графику для трех значений разности температур  $\Delta t$  разность времени нагрева калориметра с образцом и пустого калориметра  $\Delta \tau$ .

17. Рассчитать по формуле (11) удельную теплоемкость для значений разности времени нагревания, определенных в пункте 16, и определить среднее значение удельной теплоемкости. Значения удельных теплоемкостей занести в таблицу.

18. Повторить пункты 6-13 и 16-17 сначала со стальным, а потом с латунным образцами.

Таблица 1

№ п/п	Материал	$m$ , кг	$U$ , В	$I$ , А	$t_1$ , °С	$t_2$ , °С	$\Delta t$ , °С	$\tau_1$ , с	$\tau_2$ , с	$\Delta \tau$ , с	$c$ , $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	$\langle c \rangle$ , $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$
										---	---	
										---	---	
										---	---	

#### 4. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Проведите оценку погрешностей измерений удельной теплоемкости.

1. Найдите среднее арифметическое значение удельной теплоемкости  $\langle c \rangle$  исследуемых образцов:

$$\langle c \rangle = \Sigma c_i / n,$$

где  $n$  – число измерений.

2. Определите абсолютную погрешность отдельных измерений:

$$\Delta c_i = \langle c \rangle - c_i,$$

3. Найдите сумму  $\Sigma (\Delta c_i)^2$ .

4. Вычислите среднее квадратичное отклонение:

$$S_{\langle c \rangle} = \sqrt{\Sigma (\Delta c_i)^2 / [n(n-1)]}.$$

5. Определите границы доверительного интервала:

$$\Delta c = t_{\alpha, n} \cdot S_{\langle c \rangle}.$$

Для нахождения  $t_{\alpha, n}$  используйте таблицу коэффициентов Стьюдента. Доверительную вероятность  $\alpha$  примите равной 0,95.

6. Запишите результаты измерений в виде:

$$c = \langle c \rangle + \Delta c; \alpha = 0,95; n = 3.$$

7. Определите относительную погрешность измерений удельной теплоемкости веществ:

$$\varepsilon_c = (\Delta c / \langle c \rangle) \cdot 100 \%$$

8. Согласно техническим данным экспериментальной установки ФПТ1-8 инструментальная погрешность средств измерений  $\varepsilon_{ип}$  приближенно равна 5%. Тогда полную погрешность измерений можно рассчитать по формуле:

$$\varepsilon = \sqrt{\varepsilon_c + [(t_\alpha / 3) \cdot \varepsilon_{ип}]^2},$$

где  $t_\alpha$  – коэффициент Стьюдента при заданной доверительной вероятности для большого числа измерений.

9. По формулам (7), (8) закона Дюлонга и Пти рассчитайте удельные теплоемкости для химически чистых элементов: алюминия, железа и меди, проведите сравнение теоретических данных с опытными, полученными на образцах из дюралюминия, стали и латуни.

10. Сделайте выводы по проделанной работе.

## 5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Сформулируйте и запишите закон Дюлонга и Пти.
2. Какая физическая величина называется удельной теплоемкостью вещества? Молярной теплоемкостью вещества? Назовите единицы их измерения.
3. Запишите связь между удельной и молярной теплоемкостями вещества.
4. Дайте определение степени свободы молекул.
5. Сформулируйте теорему о равномерном распределении энергии по степеням свободы.
6. Выведите формулу, применяемую для расчета удельной теплоемкости вещества в данной работе.

## 6. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Савельев, И.В. Курс физики. Т. 1: Механика. Молекулярная физика / И.В. Савельев. – М.: Наука, 1989.
2. Кикоин, А.К. Молекулярная физика / А.К. Кикоин, И.К. Кикоин. – М.: Наука, 1976.
3. Лабораторный практикум по физике / Под ред. А.С. Ахматова – М.: «Высшая школа», 1980.
4. Техническое описание экспериментальной установки ФПТ1-8.
5. Практические рекомендации по обработке результатов измерений: Методические указания / Сост.: Л.П. Муркин, Н.В. Мышкина. – Куйбышев: КуАИ, 1992.

*Учебное издание*

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ ТЕПЛОЕМКОСТИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

*Методические указания  
к лабораторной работе № 1-23*

Составители: ***Николай Михайлович Розачев***  
***Светлана Ивановна Гусева***

Редактор И.И. Спиридонова  
Вёрстка – И.И. Спиридонова

Подписано в печать 02.011.2012. Формат 60×84 1/16.  
Бумага офсетная. Печать офсетная.  
Печ. л. 0,75.

Тираж 100 экз. Заказ . Арт. М31/2012

Самарский государственный аэрокосмический университет.  
443086, Самара, Московское шоссе, 34.

---

Изд-во Самарского государственного аэрокосмического университета.  
443086, Самара, Московское шоссе, 34.





