

Федеральное агентство по образованию  
Сибирский государственный аэрокосмический университет  
имени академика М. Ф. Решетнева

УДК 537.2 (075.5)

Рецензент доктор физико-математических наук,  
профессор Е. В. БАБКИН

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ ТЕПЛОЕМКОСТИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

*Методические указания к выполнению  
лабораторной работы 9*

**Определение удельной теплоемкости твердых тел:** Метод.  
указания к выполнению лабораторной работы 9 / Сост. А. Г. Баранов,  
Т. А. Слинкина; СибГАУ. Красноярск, 2005. 15 с.

В методической разработке приведены краткая теория, описание экспериментальной установки и порядок проведения работы. Даны вопросы и список рекомендуемой литературы, необходимые для подготовки, проведения и защиты работы.

Красноярск 2005

© Сибирский государственный аэрокосмический  
университет имени академика М. Ф. Решетнева, 2005

## Лабораторная работа 9

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ ТЕПЛОЕМКОСТИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

*Цель работы:*

Произвести измерения для определения удельной теплоемкости стали, алюминия, латуни.

*Приборы и принадлежности:*

1. Лабораторная установка ФПТ 1-8.
2. Исследуемые образцы: стальной, алюминиевый, латунный.

#### 1. КРАТКАЯ ТЕОРИЯ ТЕПЛОЕМКОСТИ

Одним из основных тепловых свойств тел, широко используемых в термодинамическом методе исследования, является **теплоемкость**.

**Удельной теплоемкостью вещества** называется величина, равная количеству теплоты, необходимому для нагревания 1 кг вещества на 1 К:

$$c = \frac{\delta Q}{m dT}. \quad (1)$$

Единица удельной теплоемкости – джоуль на килограмм-кельвин (Дж/кгК).

**Молярной теплоемкостью вещества** называется величина, равная количеству теплоты, необходимому для нагревания 1 моль вещества на 1 К:

$$C_\mu = \frac{\delta Q}{\nu \cdot dT}, \quad (2)$$

где  $\nu = \frac{m}{\mu}$  – количество вещества;  $\mu$  – молярная масса вещества;  $m$  – масса вещества.

Единица молярной теплоемкости – джоуль на моль кельвин (Дж/мольК).

Удельная теплоемкость связана с молярной  $C_\mu$  соотношением

$$C_\mu = c \cdot \mu. \quad (3)$$

Различают теплоемкости при постоянном объеме и постоянном давлении, если в процессе нагревания вещества его объем или давление поддерживается постоянным.

Запишем выражение первого начала термодинамики для 1 моль газа с учетом формулы (2):

$$C_\mu \cdot dT = dU_\mu + p dV_\mu. \quad (4)$$

Если газ нагревается при постоянном объеме, то работа внешних сил равна нулю и сообщаемая газу извне теплота идет только на увеличение его внутренней энергии:

$$C_V = \frac{dU_\mu}{dT}, \quad (5)$$

т. е. молярная теплоемкость газа при постоянном объеме  $C_V$  равна изменению внутренней энергии 1 моля газа при повышении его температуры на 1 К.

Внутренняя энергия одного моля газа выражается формулой:

$$U_\mu = \frac{i}{2} RT. \quad (6)$$

Изменение внутренней энергии:

$$dU_\mu = \frac{i}{2} R \cdot dT, \quad (7)$$

тогда

$$C_V = \frac{i}{2} R, \quad (8)$$

где  $i$  – число степеней свободы молекул газа;  $R$  – универсальная газовая постоянная.

Если газ нагревается при постоянном давлении, то выражение (4) можно записать в виде:

$$C_p = \frac{dU_\mu}{dT} + \frac{p \cdot dV_\mu}{dT}.$$

Учитывая, что  $\frac{dU_\mu}{dT}$  не зависит от вида процесса и всегда равна

$C_V$ , и дифференцируя уравнение Менделеева–Клапейрона

$$pV_{\mu} = RT$$

по  $T$  ( $p = \text{const}$ ), получаем

$$C_p = C_v + R. \quad (9)$$

**Выражение (9) называется уравнением Майера.** Оно показывает, что  $C_p$  всегда больше  $C_v$  на величину молярной газовой постоянной. Это объясняется тем, что при нагревании газа при постоянном давлении требуется еще дополнительное количество теплоты на совершение работы расширения газа, так как постоянство давления обеспечивается увеличением объема газа. Используя (8), выражение (9) можно записать в виде:

$$C_p = \frac{i+2}{2} R. \quad (10)$$

Молекулу одноатомного газа можно рассматривать как материальную точку. Такая молекула (точнее, атом) имеет три степени свободы поступательного движения. Молекула двухатомного газа помимо трех степеней свободы поступательного движения имеет две степени свободы вращательного движения. Молекулы, состоящие из трех и более жестко связанных атомов, имеют, подобно твердому телу, шесть степеней свободы: три степени свободы поступательного движения и три степени свободы вращательного движения.

Согласно закону равномерного распределения энергии по степеням свободы **на каждую степень свободы молекулы в среднем приходится одинаковая кинетическая энергия, равная  $\frac{1}{2}kT$ ,** где  $k$  – постоянная Больцмана.

Модель молекулы в виде жестко связанных атомов является чрезмерно упрощенной. Во многих случаях приходится учитывать возможность относительных смещений атомов в молекуле, т. е. вводить в рассмотрение колебательные степени свободы. Например, нежесткая двухатомная молекула имеет одну колебательную степень свободы, а нежесткая трехатомная молекула – три колебательные степени свободы.

При колебательном движении молекула имеет и кинетическую  $W_k$ , и потенциальную  $W_{\Pi}$  энергии. Если колебания гармонические, то в среднем эти энергии равны друг другу.

Таким образом, в соответствии с законом равномерного распределения энергии средняя полная энергия, приходящаяся на одну колебательную степень свободы молекулы, равна

$$\langle W_0 \rangle = \langle W_{\text{по}} \rangle + \langle W_{\text{ко}} \rangle = 2\langle W_{\text{ко}} \rangle = kT. \quad (11)$$

Она вдвое превышает среднюю энергию, приходящуюся на одну степень свободы поступательного и вращательного движения молекулы.

Для твердых тел не различаются теплоемкости  $C_v$  и  $C_p$ . Основной вклад в теплоемкость неметаллических твердых тел вносит энергия тепловых колебаний частиц, находящихся в узлах кристаллических решеток. Для металлов незначительный вклад в теплоемкость вносит вырожденный электронный газ.

В качестве модели твердого тела рассмотрим правильно построенную кристаллическую решетку, в узлах которой частицы (атомы, ионы, молекулы), принимаемые за материальные точки, колеблются около своих положений равновесия – узлов решетки – в трех взаимно перпендикулярных направлениях. Таким образом, каждой составляющей кристаллической решетки частице приписывается три колебательных степени свободы, каждая из которых, согласно закону равномерного распределения энергии по степеням свободы обладает энергией, равной  $kT$  (11).

Внутренняя энергия моля твердого тела:

$$U_{\mu} = 3N_A kT = 3RT,$$

где  $N_A$  – постоянная Авогадро,  $N_A k = R$ .

Молярная теплоемкость твердого тела:

$$C_v = \frac{dU_{\mu}}{dT} = 3R = 25 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К}), \quad (12)$$

т. е. молярная (атомная) теплоемкость **химически простых тел** в кристаллическом состоянии одинакова (равна  $3R$ ) и не зависит от температуры. Этот закон был эмпирически получен французским ученым П. Дюлонгом и Л. Пти и носит название **закона Дюлонга и Пти**.

Если твердое тело является химическим соединением (например,  $\text{NaCl}$ ), то число частиц в моле не равно постоянной Авогадро, а равно  $nN_A$ , где  $n$  – число атомов в молекуле (для  $\text{NaCl}$  число частиц в

моле равно  $2N_A$ , так как в одном моле NaCl содержится  $N_A$  атомов Na и  $N_A$  атомов Cl). Таким образом, молярная теплоемкость твердых химических соединений

$$C_V = 3nR \approx 25n \text{ Дж/(моль·К)},$$

т. е. равна сумме атомных теплоемкостей элементов, составляющих это соединение. Как показывают опытные данные (табл. 1), для многих веществ закон Дюлонга и Пти выполняется с довольно хорошим приближением, хотя некоторые вещества (C, Be, B) имеют значительные отклонения от вычисленных по закону теплоемкостей.

Таблица 1

Вещество	C, Дж/(моль·К)	
	Теоретическое значение	Экспериментальное значение
Алюминий Al	25	25.5
Алмаз C	25	5.9
Бериллий Be	25	15.6
Бор B	25	13.5
Железо Fe	25	26.8
Серебро Ag	25	25.6
NaCl	50	50.6
AgCl	50	50.9
CaCl <sub>2</sub>	75	76.2

Кроме того, опыты по измерению теплоемкости твердых тел при низких температурах показали, что она зависит от температуры (рис. 1). Вблизи нуля Кельвина теплоемкость тел пропорциональна  $T^3$ , и только при достаточно высоких температурах, характерных для каждого вещества, выполняется условие (12). Алмаз, например, имеет теплоемкость, равную  $3R$

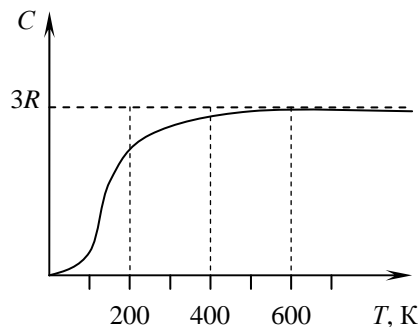


Рис. 1

при 1 800 К. Однако для большинства твердых тел комнатная температура является уже достаточно высокой.

Расхождение опытных и теоретических значений теплоемкостей, вычисленных на основе классической теории, объяснили, исходя из квантовой теории теплоемкостей, А. Эйнштейн и П. Дебай.

## 2. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ УСТАНОВКИ

Удельная теплоемкость твердого тела определяется по формуле

$$c = \frac{Q}{m\Delta t}, \quad (13)$$

где  $c$  – удельная теплоемкость тела;  $Q$  – количество теплоты, поглощенное образцом при нагревании на  $\Delta t$  К;  $m$  – масса образца;  $\Delta t$  – разность конечной и начальной температур.

Если для нагрева пустого калориметра на  $\Delta t$  К требуется  $Q_1$  джоулей тепла, а для нагрева калориметра с исследуемым образцом на  $\Delta t$  К –  $Q_2$  джоулей тепла, то на нагрев самого образца идет:

$$Q_{\text{обр}} = Q_2 - Q_1. \quad (14)$$

В установке ФПТ1-8 нагрев производится пропусканием тока через нагреватель.

Количество теплоты, выделяемое нагревателем:

$$Q = IU\tau, \quad (15)$$

где  $I$  – сила тока через нагреватель;  $U$  – напряжение, приложенное к нагревателю;  $\tau$  – время нагрева.

Если мощность нагрева остается постоянной в течение всего эксперимента, то после подстановки выражения для количества теплоты из (15) в (14) получим:

$$Q_{\text{обр}} = IU(\tau_2 - \tau_1), \quad (16)$$

где  $\tau_1$  – время нагрева пустого калориметра на  $\Delta t$  К;  $\tau_2$  – время нагрева калориметра с образцом на  $\Delta t$  К, тогда

$$c = \frac{IU(\tau_2 - \tau_1)}{m\Delta t}. \quad (17)$$

## 3. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

**3.1.** Установка ФПТ1-8 представляет собой конструкцию настольного типа, состоящую из трех основных частей (см. рис. 2):

- 1) блока приборного БП-8 (поз. 1);
- 2) блока рабочего элемента РЭ-8 (поз. 2);
- 3) стойки (поз. 3).

**3.2.** Блок приборный БП-8 представляет собой единый конструктив со съемной крышкой, съемными лицевыми панелями. Внутри блока размещена печатная плата с радиоэлементами, органы подключения, регулирования, трансформаторы.

**3.2.1.** На лицевой панели приборного блока БП-8 расположены органы управления и регулирования, цифровой контроллер для измерения времени, амперметр, вольтметр.

Лицевая панель условно разделена на 3 функциональных узла:

- 1) узел «измерение»;
- 2) узел «нагрев»;
- 3) узел «сеть».

**3.2.1.1.** Узел «измерение» состоит из цифрового контроллера для измерения времени, амперметра, вольтметра и осуществляет замер величины тока, напряжения, времени проведения опыта.

**3.2.1.2.** Узел «нагрев» осуществляет включение и регулирование нагрева нагревателя.

**3.2.1.3.** Узел «сеть» осуществляет подключение установки к сети питающего напряжения.

**3.2.2.** С задней стороны приборного блока установлены

- 1) разъем для подключения кабеля от блока РЭ-8
- 2) сетевой предохранитель
- 3) сетевой шнур подвода питания.

**3.3.** Блок РЭ-8 представляет собой коробчатый конструктив, укрепленный на горизонтальном основании стойки. Несущими узлами блока РЭ-8 являются панель и кронштейн, скрепленные между собой винтами. Спереди блок РЭ-8 закрыт съемным экраном из оргстекла. При выполнении работы экран навешивается на заднюю стенку блока РЭ-8. На панели расположен цифровой контроллер для измерения температуры. Внизу на выступающей панели размещены образцы из различных материалов и рукоятка для установки образцов в нагреватель.

**3.3.1.** Нагреватель состоит из металлического кожуха, теплоизолирующего материала, калориметра с намотанной на нем спиралью,

ручки выталкивания образца из калориметра. В калориметр вмонтирован датчик контроллера для изменения температуры.

**3.4.** Стойка представляет собой настольную конструкцию с горизонтальным основанием для установки приборного блока БП-8 и блока РЭ-8.

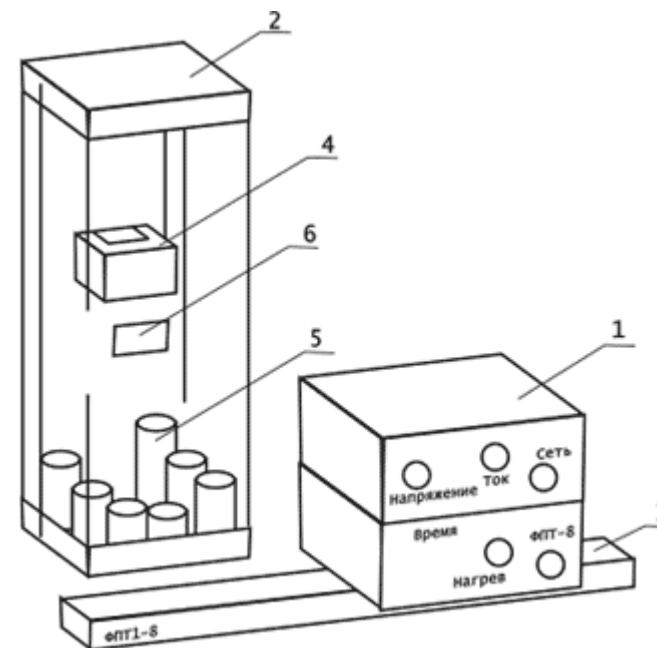


Рис. 2. Установка ФПТ 1-8:

1 – блок приборный БП-8; 2 – блок РЭ-8; 3 – стойка;  
4 – нагреватель; 5 – образец; 6 – цифровой контроллер  
для измерения температуры U838

#### 4. ОПИСАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРИНЦИПИАЛЬНОЙ СХЕМЫ

**4.1.** Установка ФПТ1-8 запитывается через вилку ХР1.

**4.2.** Предохранитель FU1 защищает установку от перегрузок и токов короткого замыкания.

**4.3.** Трансформатор TV1 является источником переменного тока напряжением 25В, а трансформатор TV2 – 15В.

**4.4.** Светодиод VD1 сигнализирует о подаче питания на установку.

**4.5.** Светодиод VD3 сигнализирует о подаче напряжения на нагревателе EK1. Регулирование температуры нагревателя EK1 осуществляется резистором R1, амперметр A2-6 и вольтметр A2-7 служат для контроля тока и напряжения на нагревателе EK1.

**4.6.** Цифровой контроллер для измерения температуры A1-1 запитан с платы A2-1 постоянным током с напряжением 9В. В качестве датчика температуры используется датчик цифрового контроллера для измерения температуры.

**4.7.** Цифровой контроллер для измерения времени запитан с платы A2-1 постоянным током напряжением 1,5В.

**4.8.** Тумблеры SA1 и SA2 служат для включения питания и нагревателя соответственно.

**4.9.** Блок РЭ-8 подключен к блоку приборному через разъем XS1 и включает в себя нагреватель EK-1 и цифровой контроллер для измерения температуры.

## 5. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

**5.1.** Вывести на минимум ручки потенциометров, повернув их в крайнее левое положение.

**5.2.** Снять экран с блока РЭ-8 и подвесить его на специальные винты с задней стороны блока РЭ-8.

**5.3.** Образцы, рукоятку вставить в гнезда блока РЭ-8.

**5.4.** Подключить вилку питания к розетке сети переменного тока, напряжением 220 В.

**5.5.** Включить тумблер в модуле питания СЕТЬ.

**5.6.** Убедиться, что в калориметре отсутствует образец. Плотнo закрыть крышку калориметра.

**5.7.** Включить модуль нагрев тумблером «ВКЛ». Регулятором модуля установить мощность нагрева. Номинальное напряжение на нагревателе 18 В.

**5.8.** Одновременно с включением тумблера «ВКЛ» нажмите кнопку цифрового контроллера для измерения времени.

**5.9.** Контролировать температуру по цифровому контроллеру для измерения температуры. Начальную температуру измерить до включения нагревателя. Конечная температура не должна превышать 44 °С.

**5.10.** При достижении необходимой температуры ( $\approx 40^\circ$ ), выключить контроллер времени и нагрев. Начальную, конечную температуру и время нагрева  $\tau_1$  калориметра записать в табл. 2.

**5.11.** Охладить калориметр до начальной (комнатной) температуры. Для быстрого охлаждения калориметра надо выключить нагрев, открыть крышку, опустить в калориметр один из образцов. Температура начинает понижаться. Когда темп охлаждения снизится, нагретый образец вынуть и вложить следующий (холодный).

Для внимания образца надо повернуть по часовой стрелке винт в нижней части калориметра, после чего вынуть образец рукояткой.

**5.12.** Нагрев калориметра с исследуемым образцом рекомендуется производить через 2–3 мин. после помещения образца в калориметр и закрытия крышки.

Записать начальную температуру калориметра с образцом, включить нагреватель, установить необходимую мощность нагрева (такую же, как в случае пустого калориметра) с одновременным пуском контроллера времени. Калориметр с образцом нагреть на такую же разность температур  $\Delta t$ , как и при нагревании пустого калориметра.

**5.13.** Записать в таблицу значения  $\Delta t$  и время нагрева  $\tau_2$  калориметра с образцом.

**5.14.** По формуле (17) рассчитать удельную теплоемкость данного образца.

**5.15.** Провести измерения с другим образцом по пунктам 5.11–5.14.

Таблица 2

Материал образца	Масса образца $m$ , кг	Разность температур $\Delta t$ °С	Время нагр. пустого калориметра $\tau_1$ , с	Время нагр. калориметра с образцом $\tau_2$ , с	Сила тока $I$ , А	Напряжение $U$ , В	Удельная теплоемкость $c$ , Дж/кгК
Сталь							
Алюминий							
Латунь							

**5.16.** Произведите расчеты удельной теплоемкости исследуемых образцов по формуле Дюлонга и Пти (12) и сравните с экспериментальными результатами. Сделайте выводы.

## 6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте определение внутренней энергии термодинамической системы.
2. В результате каких процессов может изменяться внутренняя энергия системы?
3. Что такое удельная теплоемкость вещества? Молярная теплоемкость вещества? Какая связь между ними?
4. Как отличается молярная теплоемкость газа при изохорном процессе ( $C_V$ ) и при изобарном процессе ( $C_p$ ) Дайте объяснение.
5. Выразите молярную теплоемкость при изохорном процессе ( $C_V$ ) и при изобарном процессе ( $C_p$ ) через число степеней свободы молекул.
6. Сколько степеней свободы могут иметь одноатомный газ, двухатомный и многоатомные газы? Какие степени свободы могут иметь эти газы?
7. Имеется ли различие между  $C_V$  и  $C_p$  твердых тел.
8. Какими степенями свободы молекул определяется молярная теплоемкость твердых тел. Сформулируйте закон Дюлонга и Пти.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Детлаф, А. А. Курс физики / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский. М.: Высш. шк., 1999.
2. Трофимова, Т. И. Курс физики / Т. И. Трофимова. М.: Высш. шк., 1985.
3. Савельев, И. В. Курс общей физики / И. В. Савельев. Т. 2. М.: Наука, 1978.

Методическое издание

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ ТЕПЛОЕМКОСТИ  
ТВЕРДЫХ ТЕЛ**

Методические указания к выполнению  
лабораторной работы 9

Составители

БАРАНОВ Александр Григорьевич  
СЛИНКИНА Тамара Александровна

Подписано в печать 10.02.2005. Формат 60×84/16. Бумага офисная.  
Гарнитура «Таймс». Печать плоская. Уч.-изд. л. 0,95. Усл. п. л. 0,89.  
Тираж 200 экз. Заказ С

Отпечатано в отделе копировально-множительной техники СибГАУ.  
660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31.