

## Лабораторная работа № 8

### Определение теплоёмкости твёрдых тел методом охлаждения

*Цель работы* – нахождение температурной зависимости теплоёмкости металлов и проверка закона Дюлонга и Пти.

#### Теоретическая часть

Согласно классической теории теплоёмкости при достаточно высоких температурах молярная теплоёмкость химически простых веществ в кристаллическом состоянии одинакова и равна  $25 \text{ Дж}/(\text{моль}\cdot\text{К})$  – закон Дюлонга<sup>1</sup> и Пти<sup>2</sup>.

Частицы в твёрдом теле совершают тепловые колебания около положения своего равновесия. Полная энергия частицы равна сумме кинетической и потенциальной энергий

$$U = E_k + E_p. \quad (1)$$

Потенциальная и кинетическая энергии колеблющихся молекул являются периодическими функциями времени, но их средние значения равны  $\langle E_k \rangle = \langle E_p \rangle$ . Поэтому полная энергия молекулы

$$\langle U \rangle = 2\langle E_k \rangle. \quad (2)$$

Из кинетической теории идеального газа известно, что средняя кинетическая энергия одноатомных молекул

$$\langle E_k \rangle = \frac{3}{2}kT, \quad (3)$$

где  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – абсолютная температура. Так как при высоких температурах колебания частиц твёрдого тела независимы, последняя формула применима и для них. Тогда из формул (2) и (3) имеем

$$\langle U \rangle = 3kT. \quad (4)$$

---

<sup>1</sup>Дюлонг (Dulong) Пьер Луи (1785-1838), французский физик и химик, член Парижской АН (1823). По образованию врач. Профессор химии Ветеринарной школы. С 1820 профессор физики Политехнической школы в Париже.

<sup>2</sup>Пти (Petit) Алекси Терез (1791-1820), французский физик. В 1809 окончил Политехническую школу в Париже. С 1810 преподавал в лицее Бонапарта, с 1815 профессор Политехнической школы.

Внутренняя энергия одного моля вещества, очевидно, будет равна

$$U_m = \langle U \rangle N_A = 3kN_A T = 3RT, \quad (5)$$

где  $N_A$  – постоянная Авогадро,  $R$  – универсальная газовая постоянная.

Для твёрдых тел теплоёмкости  $C_{m p}$  и  $C_{m v}$  практически равны вследствие малости коэффициента теплового расширения, поэтому теплоёмкость твёрдых тел можно считать постоянной и равной теплоёмкости при постоянном объёме

$$C_m = \frac{dU_m}{dT}. \quad (6)$$

Тогда из формул (5) и (6) следует для всех твёрдых тел, что  $C_m = 3R \approx 25 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$ .

Опыт показывает, что постоянство теплоёмкости твёрдых тел нарушается при понижении температуры. Зависимость теплоёмкости твёрдых тел от температуры показана на рис. 1.

Удовлетворительно объяснил зависимость теплоёмкости твёрдых тел от температуры Дебай на основе квантовой теории. Характерная температура, выше которой выполняется закон Дюлонга и Пти, называется температурой Дебая. Для алюминия, железа и меди температуры Дебая соответственно равны 375, 360 и 340 К.

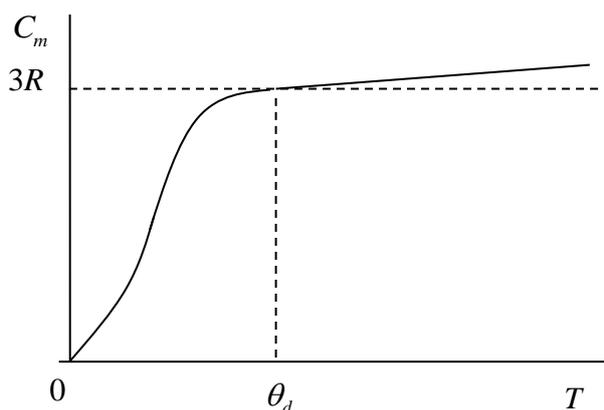


Рис. 1. Зависимость теплоёмкости от температуры

### Экспериментальная часть

В данной работе используется метод сравнения, когда по известной теплоёмкости одного тела (эталоны) определяются теплоёмкости других твёрдых тел. Любое тело, имеющее температуру выше температуры окружающей среды, будет охлаждаться. Скорость охлаждения для различных образцов металлов различна и зависит также от теплоёмкости этих образцов. Количество тепла, теряемое однородным образцом металла за промежуток времени  $d\tau$  можно вычислить по формуле

$$dQ = cm dT, \quad (7)$$

где  $c$  – удельная теплоёмкость,  $m$  – масса,  $dT$  – бесконечно малое изменение температуры образца.

Это же количество тепла можно рассчитать по формуле Ньютона

$$dQ = \alpha(T - T_0)S d\tau, \quad (8)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, зависящий от состояния поверхности,  $T$  – температура образца,  $T_0$  – температура окружающей среды,  $S$  – площадь поверхности образца.

Однородными будем считать образцы, у которых  $c$ ,  $\alpha$  и  $T$  не зависят от координат точек в образце. Температура принимается одинаковой во всех точках образца, в силу его малых размеров и большой теплопроводности. Из уравнений (7) и (8) получим

$$cm dT = \alpha(T - T_0)S d\tau \quad (9)$$

или

$$cm \frac{dT}{d\tau} = \alpha(T - T_0)S. \quad (10)$$

Написав полученное соотношение для двух образцов, полагая при этом, что  $S = S_3$ ,  $T = T_3$ ,  $\alpha = \alpha_3$ , делением одного выражения на другое получим

$$c = c_3 \frac{m_3 (dT/d\tau)_3}{m (dT/d\tau)}, \quad (11)$$

где  $c_3$  – удельная теплоёмкость эталона (медный образец),  $m_3$  – масса эталона,  $(dT/d\tau)_3$  – скорость охлаждения эталона, а  $c$ ,  $m$ ,  $dT/d\tau$  – соответствующие величины для исследуемого образца.

## Описание установки и метод измерения

Экспериментальная установка схематически изображена на рис. 2. Образцы (1) одинакового объёма имеют цилиндрическую форму с высверленным с одного конца каналом. Этим каналом образец надевают на фарфоровую трубку, через которую выведен спай термопары (2). Концы проводов термопары подведены к мультиметру (3). Температура образца определяется по показаниям милливольтметра и графику зависимости термоЭДС термопары от температуры. В установке используется стандартная термопара группы ХА (хромель-алюмель). Образцы нагреваются в электропечи (4), питаемой переменным током через лабораторный источник В24М (5). Электропечь может перемещаться по направляющему стержню и фиксироваться на необходимой высоте стопорным винтом (6). Фото установки приведено на рис. 3.

## Выполнение работы

1. Подключить мультиметр к термопаре. Перевести его в режим измерения температуры.
2. Определить массу образцов. Результаты измерения запишите в таблицу 1.

Таблица 1

Медь (эталон)	Железо	Алюминий
$m_m =$ Г	$m_{жс} =$ Г	$m_a =$ Г

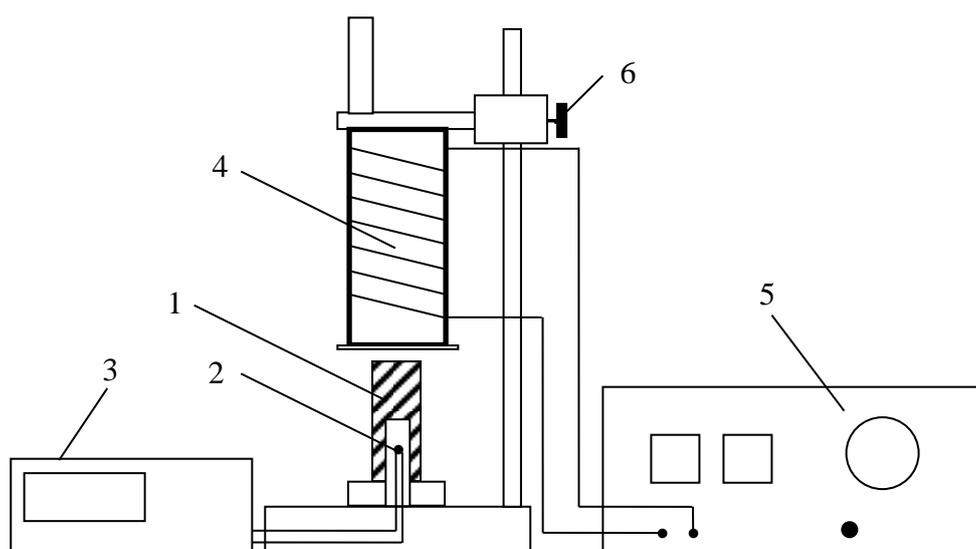


Рис. 2. Схема установки

$t_m, ^\circ\text{C}$	$T_m, \text{K}$	$t_{ж}, ^\circ\text{C}$	$T_{ж}, \text{K}$	$t_a, ^\circ\text{C}$	$T_a, \text{K}$
...	...	...	...	...	...

3. Поднять печь вверх и закрепить стопорным винтом.
4. Аккуратно, чтобы не сломать фарфоровую трубку термодпары, поместить на неё эталонный образец из меди.
5. Медленно опустить печь вниз до конца. Следить за тем, чтобы образец свободно входил внутрь печи.
6. Установив рукоятку В24М в крайне левое положение, включить источник в сеть, установить рукоятку В24М в крайне правое положение.
7. Следить за показаниями мультиметра (3). Когда они достигнут  $500\text{ }^\circ\text{C}$ , выключить печь, поднять её осторожно вверх, чтобы не сбросить образец с фарфоровой трубки, и закрепить.
8. После поднятия печи образец начнет охлаждаться. При показании мультиметра  $450\text{ }^\circ\text{C}$  включить секундомер и через равные промежутки времени (15 секунд) записывать показания мультиметра в таблицу 1.
9. При охлаждении образца до  $50\text{ }^\circ\text{C}$ , запись показаний приборов прекратить.
10. При показаниях мультиметра  $40\text{ }^\circ\text{C}$  осторожно снять образец с фарфоровой трубки.



Рис. 3. Экспериментальная установка

11. Всё перечисленное в пунктах 2-9 проделать с образцами из железа и алюминия (то есть нагреть, охладить, записать результаты измерений в таблицу).
12. Построить два графика зависимости температуры эталона от температур исследуемых образцов  $T_m = f(T_{жс})$ ,  $T_m = f(T_a)$  – это возможно т.к. измерения температуры для различных образцов выполнялись в одинаковые моменты времени  $\tau$ . В этом случае выражение (11) может быть приведено к виду

$$c = c_3 \frac{m_3}{m} \frac{dT_3}{dT}, \quad (12)$$

тогда тангенс угла наклона построенных выше зависимостей позволит определить  $k = \frac{dT_3}{dT}$ .

13. По формуле (12) найти значения теплоёмкостей образцов для различных температур (**точные значения задаёт преподаватель** (например, 400, 300, 200 и 100 °С)). Удельная теплоёмкость эталона для различных температур дана в таблице 2.
14. Вычислить молярные теплоёмкости меди, железа и алюминия. Сопоставить их между собой и со значением, полученным в классической теории. Рассчитать абсолютную и относительную погрешности измерений.

Таблица 2

Температура меди $T$ , °С	100	200	300	400
Удельная теплоёмкость меди $c$ , Дж/(кг·К)	393	403	413	423

### Контрольные вопросы

1. Что называется теплоёмкостью тела и удельной теплоёмкостью вещества? В каких единицах измеряются эти величины?
2. Каков физический смысл теплоёмкости твёрдого тела по классическим представлениям?
3. Объясните зависимость удельной теплоёмкости твёрдого тела от вещества и температуры.
4. От каких причин зависит скорость охлаждения тела?
5. Изложите идею опыта по определению удельной теплоёмкости твёрдого тела и выведите рабочую формулу.

## Литература

1. Кикоин И.К., Кикоин А.К. Молекулярная физика.– СПб. Лань, 2008. — 480 с.
2. Савельев И.В. Курс общей физики. В 3 т. Том 1. Механика. Молекулярная физика. - 13-е изд., стер. – СПб. : Лань, 2017. — 436 с.
3. Физические величины Справочник / Под ред. И. К. Кикоина.– М. Атомиздат, 1976.

**Лабораторная работа № 8. Лист отчёта**  
**Определение теплоёмкости твёрдых тел методом охлаждения**

Выполнил студент \_\_\_\_\_  
 Факультет \_\_\_\_\_ курс \_\_\_\_\_ группа \_\_\_\_\_  
 Проверил \_\_\_\_\_  
 Показания сняты \_\_\_\_\_  
 Зачтено \_\_\_\_\_

Погрешности измерительных приборов  $\alpha =$  \_\_\_\_\_

Измерительный прибор	$\omega$ – цена деления	$\Delta_{\text{окр}}$ – округления	$\Delta_{\text{пр}}$ – приборная	$\Delta_{\text{суб}}$ – субъективная	Единицы измерения
Электронные весы					
Электронный термометр (мультиметр МУ 62)					

Константы и параметры установки

Температура	Величина	Значение		Абсолютная погрешность	Единицы измерения	Относительная погрешность
	$c_{\text{в1}} =$		$\pm$			
	$c_{\text{в2}} =$		$\pm$			

Результаты измерений

Величина	Значение		Абсолютная погрешность	Единицы измерения	Относительная погрешность
$m_{\text{м}} =$		$\pm$			
$m_{\text{жс}} =$		$\pm$			
$m_{\text{а}} =$		$\pm$			

Интервал времени (с)	$t_{\text{м}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{м}}, \text{K}$	$t_{\text{жс}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{жс}}, \text{K}$	$t_{\text{а}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{а}}, \text{K}$
15						
30						
45						
60						
75						
90						
105						
120						
135						
150						
165						

180						
195						
210						
225						
240						
255						
270						
285						
300						
315						
330						
345						
360						
375						
390						
405						
420						
435						
450						
465						
480						
495						
390						
405						

Формулы для расчёта косвенных измерений

Ответ:

Температура	Величина	Значение		Абсолютная погрешность	Единицы измерения	Относительная погрешность
Алюминий						
	$c_{a1} =$		$\pm$			
	$c_{a2} =$		$\pm$			
Сталь						
	$c_{c1} =$		$\pm$			
	$c_{c2} =$		$\pm$			
Табличное значение						
Алюминий						
	$c_{a1} =$		$\pm$			
	$c_{a2} =$		$\pm$			
Сталь						
	$c_{c1} =$		$\pm$			
	$c_{c2} =$		$\pm$			

Интервалы сравнений