

Измерение теплоёмкости твёрдых тел

Подготовил: Тюменев
Радик

теплоёмкость — физическая величина, определяемая как отношение количества теплоты, поглощаемой термодинамической системой при бесконечно малом изменении её температуры к величине этого изменения

В данной работе измерение теплоёмкости происходит по обычной схеме. Используя калориметр находим отношение кол-ва подведённого тепла к изменению температуры тела.

$$C = \frac{\delta Q}{dT}$$

Из-за разности температур между окружением калориметра и его полостью:

При увеличении температуры тела увеличивается теплота, уходящая через стенки. Для того чтобы устранить данную погрешность

будем производить все измерения при температуре близкой к комнатной $T \rightarrow T_k$. Однако, теперь возникает погрешность с измерением ΔT . Тогда:

$$\delta Q = P dt - \lambda(T - T_k) dt$$

$$= dT$$

$$C = \frac{P - \lambda(T - T_k)}{\left(\frac{dT}{dt}\right)}$$

$$f(T) = \frac{dT}{dt}$$

$$\left(\frac{dT}{dt}\right)_{T=T_k}$$

Используя $\left(\frac{dT}{dt}\right)_{T=T_k}$ получаем:

$$C = \frac{P}{\left(\frac{dT}{dt}\right)_{T=T_k}}$$

Температура измеряется термометром сопротивления:

$$R_0 = \frac{R_k}{1 + \alpha \Delta T_k}$$

$$\begin{aligned} R_T &= R_0(1 + \alpha \Delta T) \\ \frac{dR}{dt} &= R_0 \alpha \frac{dT}{dt} \end{aligned} \quad (1)$$

Подставляя R_0 в равенство (1), а (1) в формулу теплоёмкости приходим к конечному результату:

(Так же стоит учесть, что теплоёмкость величина аддитивная)

Расчётная формула:

$$C = \frac{PR_k \alpha}{\left(\frac{dT}{dt}\right)_{T_k} (1 + \alpha \Delta T)}$$

$$\alpha = 4,28 \cdot 10^{-3} K^{-1}$$

Экспериментальная установка

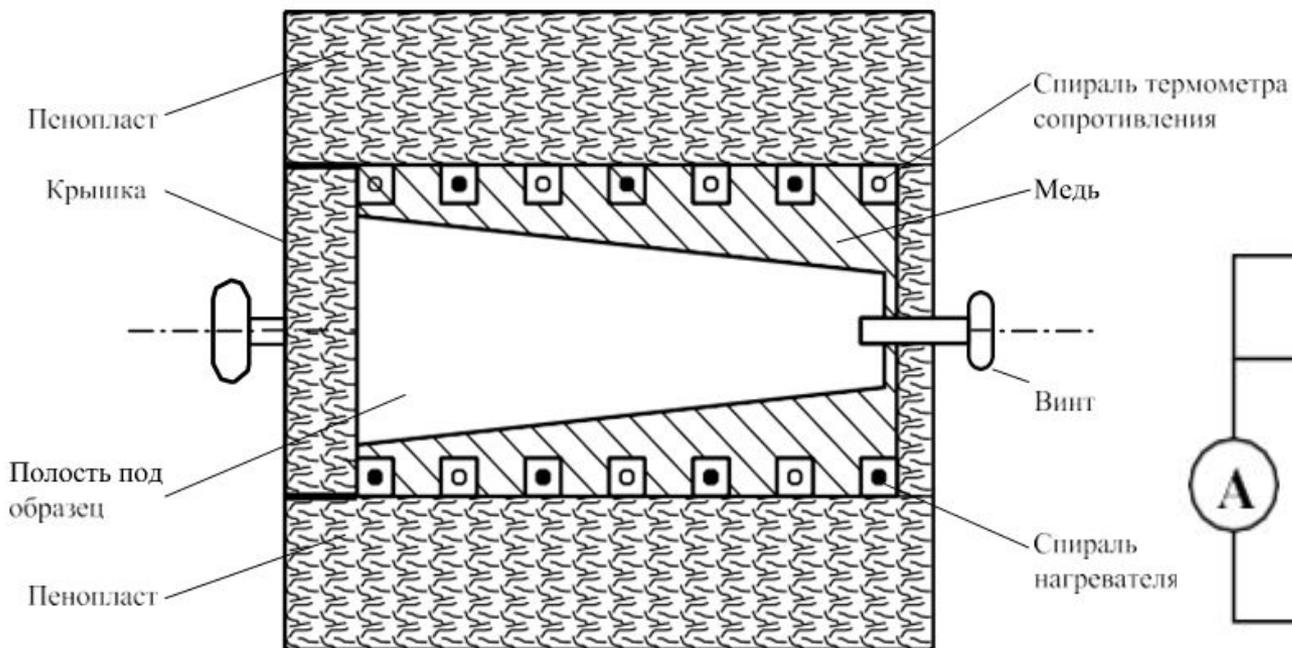


Рис. 1. Схема устройства калориметра

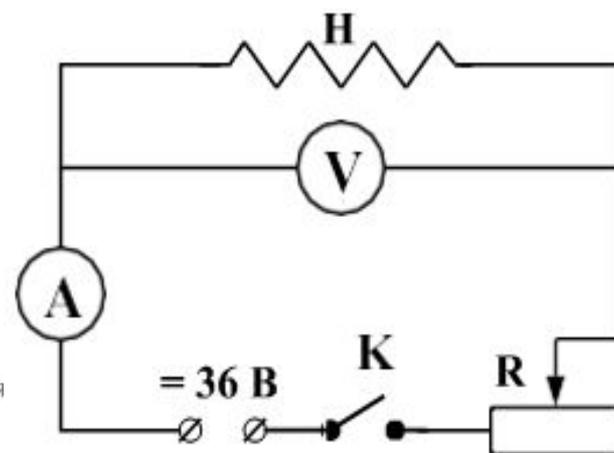
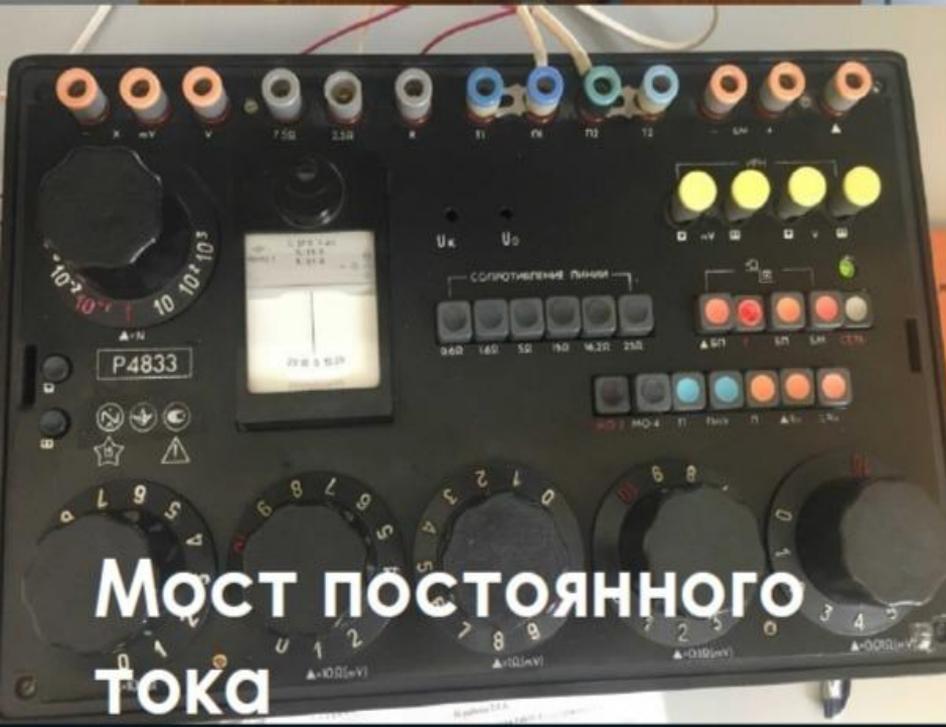


Рис. 2. Схема включения нагревателя



Начальные данные

Комнатная температура: $T_k = 22,9 \pm 0,05^\circ\text{C}$

Сопротивление термометра при начальной температуре:

$$R(T_k) = 18,28 \pm 0,1 \text{ Ом}$$

Сила тока: $I = 0,3 \pm 0,01 \text{ А}$

Напряжение: $U = 36 \pm 0,1 \text{ В}$

Мощность: $P = 10,8 \text{ Вт}$

Массы образцов и их молярная масса:

Железо: $m = 815 \pm 0,1 \text{ г}$, $\mu = 55,845 \pm 0,001 \text{ г/моль}$

Латунь: $m = 875,4 \pm 0,1 \text{ г}$, $\mu = 64,431 \pm 0,001 \text{ г/моль}$

Алюминий: $m = 294,2 \pm 0,1 \text{ г}$, $\mu = 26,981 \pm 0,001 \text{ г/моль}$

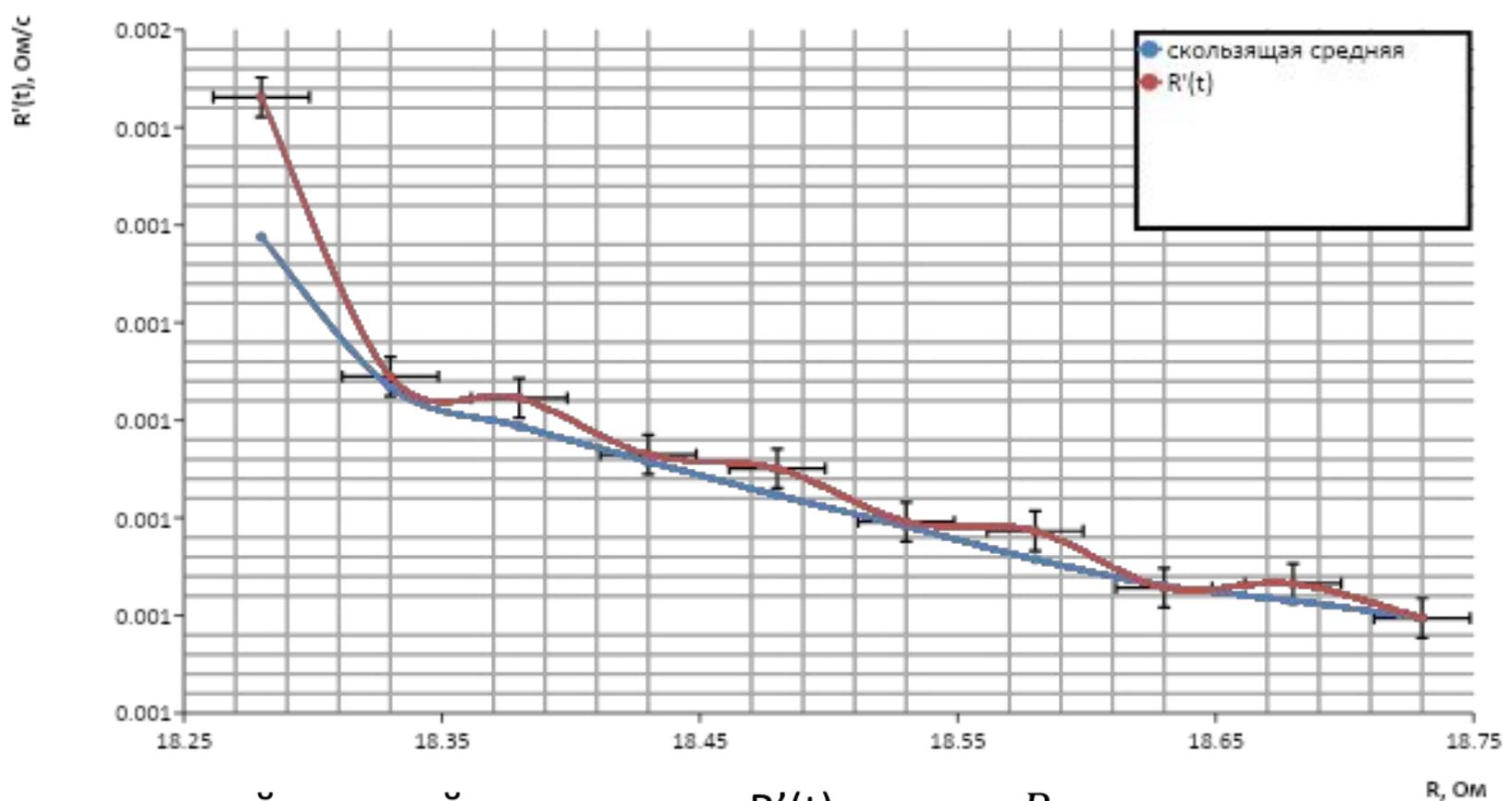
Методика измерения $\left(\frac{dR}{dt}\right)_{R_k}$

(на примере пустого калориметра)

Зависимость сопротивления термометра от температуры

t, c	0	34,94	78,62	123,15	170,1	217,7	267,9	318,5	372,4	426,0	481,77
R, Ом	18,28	18,33	18,38	18,43	18,48	18,53	18,58	18,63	18,68	18,73	18,78

Из таблицы получаем производную сопротивления по времени и строим график зависимости $(R'(t))(R)$.
Экстраполируем график к точке $R_T = R_k$ методом скользящей средней.



По графику скользящей средней определяем $R'(t)$ в точке R_k .

Тогда из конечной расчётной формулы теплоёмкость пустого калориметра:

$C_0 = 595 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$. С учётом погрешностей получаем:

$$C_0 = 595 \pm 25 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}, \varepsilon = 4,2\%$$

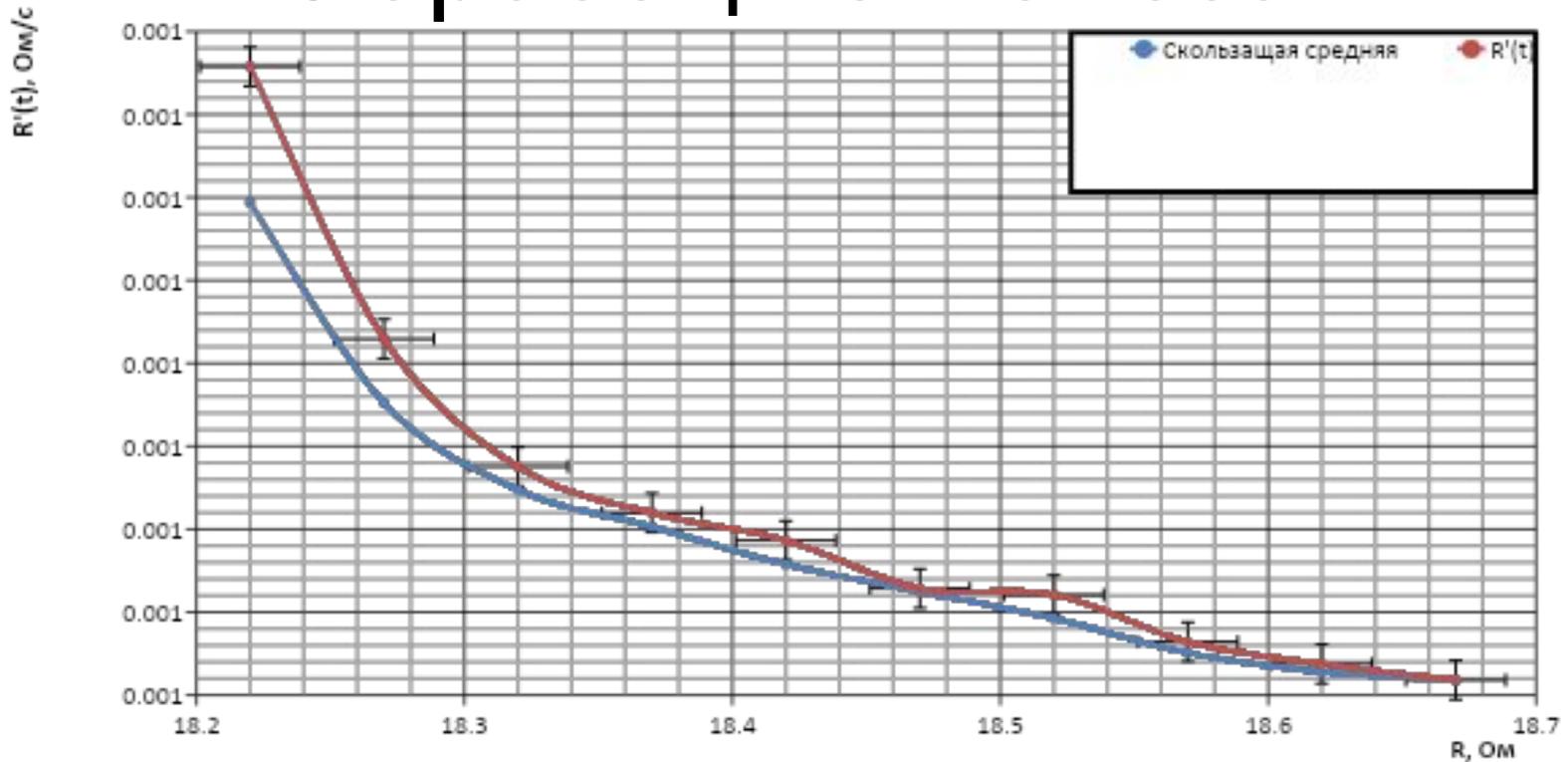
Аналогичные измерения проводим для исследуемых тел (из железа, латуни, алюминия), но из конечного результата вычитаем теплоёмкость пустого калориметра.

Так же нужно найти молярные и удельные теплоёмкости:

$$C^v = \frac{C}{\nu} = \frac{C \cdot \mu}{m}$$

$$C^{уд} = \frac{C}{m}$$

Образец из железа

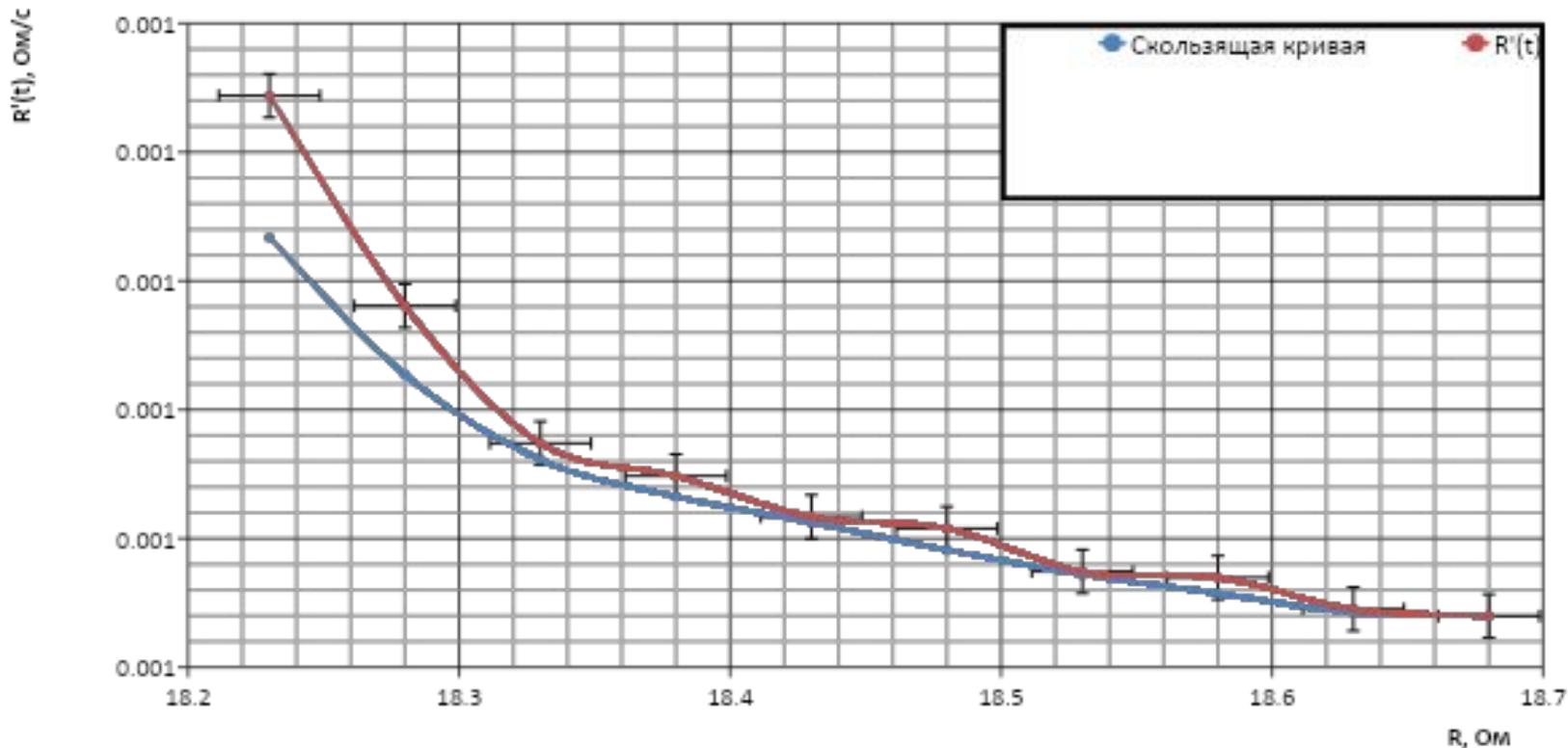


$$C_{Fe} = 262 \pm 44,5 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}, \varepsilon = 17\%$$

$$C_{Fe}^v = 18,3 \pm 3,1 \frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{моль}}, \varepsilon = 17\%$$

$$C_{Fe}^{уд} = 321,43 \pm 54,53 \frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{кг}}, \varepsilon = 17\%$$

Образец из латуни

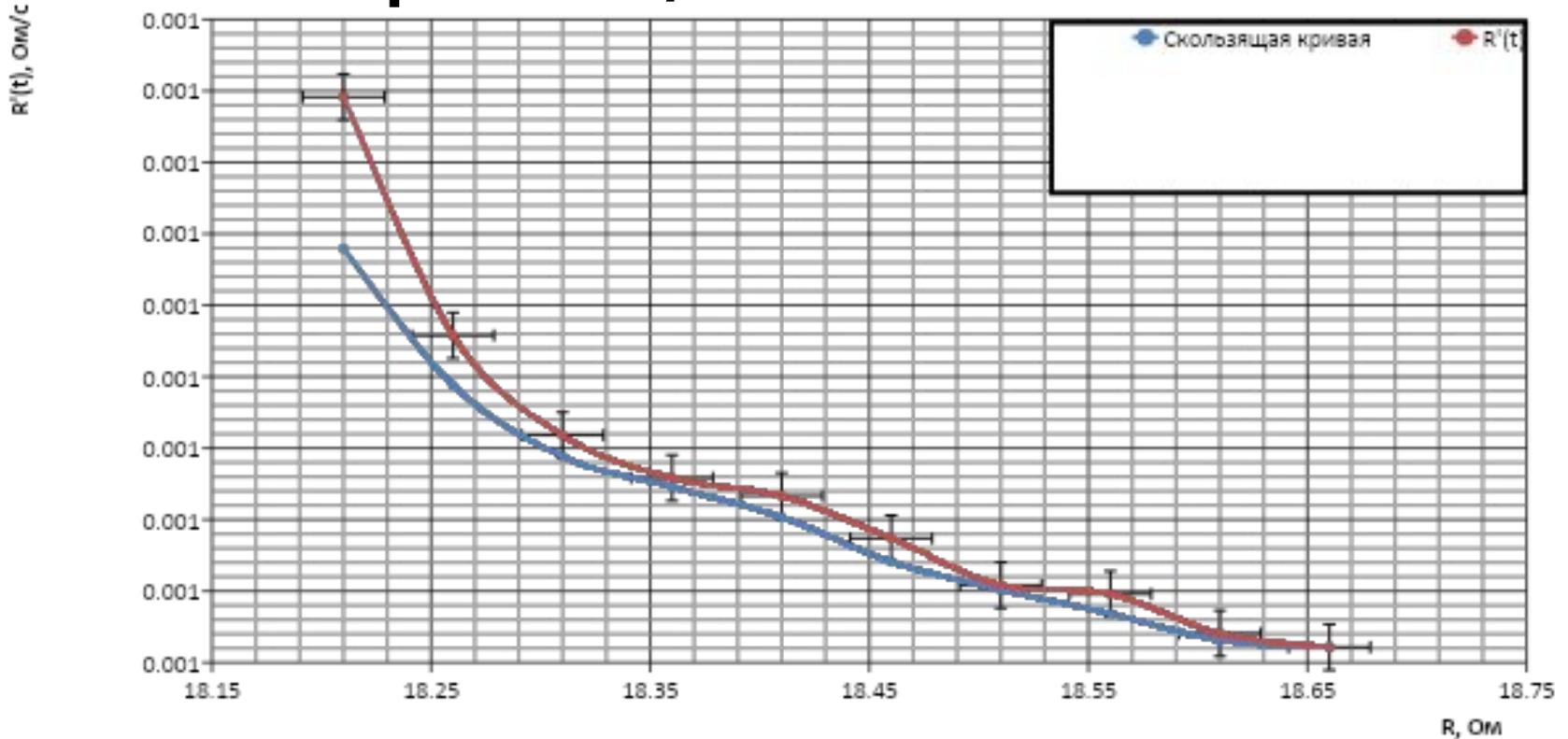


$$C_{Lt} = 228 \pm 45,75 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}, \varepsilon = 20\%$$

$$C_{Lt}^{\text{v}} = 17 \pm 3,42 \frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{моль}}, \varepsilon = 20\%$$

$$C_{Lt}^{\text{уд}} = 260 \pm 52,29 \frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{кг}}, \varepsilon = 20\%$$

Образец из алюминия



$$C_{Al} = 190 \pm 40,3 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}, \varepsilon = 21\%$$

$$C_{Al}^v = 17,45 \pm 3,7 \frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{моль}}, \varepsilon = 21\%$$

$$C_{Al}^{уд} = 646 \pm 137 \frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{кг}}, \varepsilon = 21\%$$

Вывод

В данной лабораторной работе мы измеряли теплоёмкость твёрдых тел на примере представленных образцов с помощью экспериментальной установки, представляющей собой калориметр, в стенки которого вмонтированы электронагреватель и термометр сопротивления. В результате работы электронагревателя температура внутри калориметра повышалась, в следствие чего менялось сопротивление термометра сопротивления, которое в свою очередь измерялось с помощью моста постоянного тока. Таким способом, мы можем измерять зависимость $(R'(t))(R)$, которая нам нужна для нахождения теплоёмкости. В первую очередь, мы находим теплоёмкость пустого калориметра:

$$C_0 = 595 \pm 25 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}, \varepsilon = 4,2\%$$

В последующих этапах были найдены теплоёмкости 3 исследуемых тел.

Для уменьшения погрешности, связанной с утечкой теплоты из-за разности температур между окружением калориметра и его полостью, тела не перегревались и все измерения приводились при температуре близкой к комнатной. В полученных результатах для образцов, интерес представляют значения молярных теплоёмкостей, их значения близки друг к другу:

$$C_{Al}^v = 17,45 \pm 3,7 \frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{моль}}, \varepsilon = 21\%$$

$$C_{Lt}^v = 17 \pm 3,42 \frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{моль}}, \varepsilon = 20\%$$

$$C_{Fe}^v = 18,3 \pm 3,1 \frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{моль}}, \varepsilon = 17\%$$

Отсюда можно сделать вывод, что молярная теплоёмкость для всех твёрдых тел примерно одинакова, что является правдой и $C^v \approx 3R$, примерно такое значение у нас и получилось.

Закон Дюлонга-Пти

Теплоемкость при постоянном объеме есть первая производная по температуре от внутренней энергии тела:

$$C_V = \frac{dU}{dT} \quad \text{Или для твёрдых тел:} \quad C = \frac{dU}{dT}$$

В соответствии теореме о равномерном распределении кинетической энергии по степеням свободы на каждую степень свободы приходится одна и та же кинетическая энергия равная $\varepsilon = 1/2 kT$.

В качестве модели выберем твердое тело, атомы которого совершают малые колебания около положения равновесия в узлах кристаллической решетки. Каждый атом независимо от соседей колеблется в трех взаимно перпендикулярных направлениях. То есть он имеет три независимые степени свободы. Такой атом можно уподобить совокупности трех линейных гармонических осцилляторов. При колебании осциллятора последовательно происходит преобразование кинетической энергии в потенциальную и наоборот. Поскольку средняя кинетическая энергия, составляющая $1/2 kT$ на одну степень свободы, остается неизменной, а средняя потенциальная энергия равна средней кинетической, то полная энергия осциллятора, равная сумме кинетической и потенциальной энергий, будет составлять kT .

Каждый атом рассматривается как материальная точка. Так как для поступательного движения точки число степеней свободы $i = 3$, то полная энергия колебания одного узла решетки выразится формулой: $U = 3kT$.

А для одного моля имеем:

$$\begin{aligned} U^v &= 3RT \\ C^v &= 3R \end{aligned}$$

Таким образом, атомные теплоемкости всех химически простых кристаллических тел при достаточно высокой температуре одинаковы и равны $25 \text{ Дж} \cdot \text{К}^{-1} \cdot \text{моль}^{-1}$.

Эта закономерность давно известна в физике как закон Дюлонга и Пти. Французские физики Дюлонг и Пти, исследуя теплоемкости твердых тел, еще в 1819 г. (задолго до создания классической теории теплоемкостей) из опытных данных установили этот закон.

Серьезным недостатком этой теории является вывод о независимости теплоемкости твердого тела от температуры.

Так, в соответствии с классической теорией: $C^v = 3R = \text{const}$

На самом же деле теплоемкость уменьшается с понижением температуры и стремится к нулю при приближении температуры к абсолютному нулю.