



Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова  
**Физический факультет**  
*Кафедра общей физики*

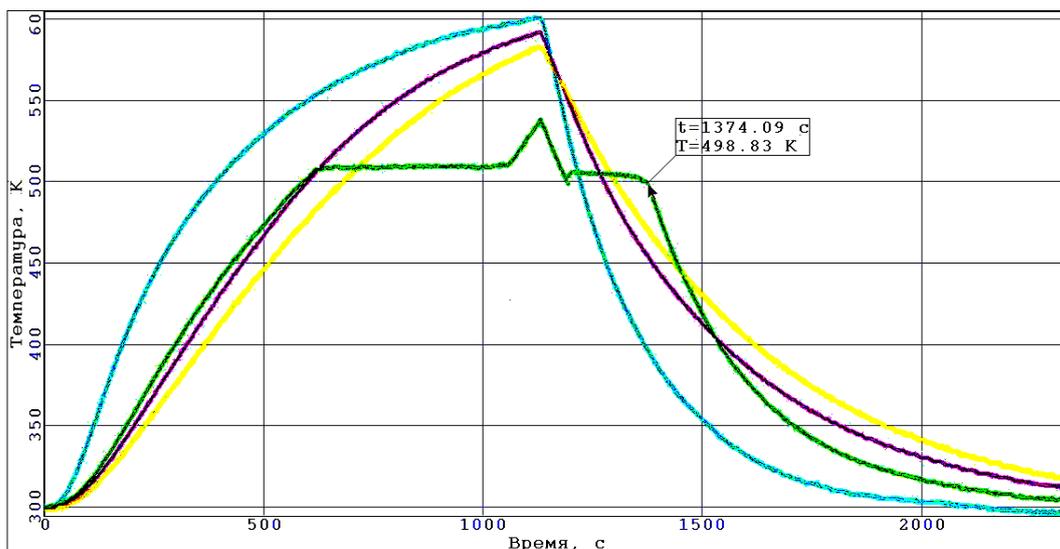
Общий Физический практикум для школьников  
(молекулярная физика)

**Лабораторные работы для школьников 210 и 238**  
**Исследование нагревания и охлаждения веществ**

**Лабораторная работа 210 шк**

**Определение теплоемкости твердых тел и теплоты кристаллизации по скорости охлаждения образцов**

**Лабораторная работа 238 шк**  
**Определение теплоёмкости жидкости**



**Москва 2017**

Практикум «Молекулярная физика и термодинамика» для школьников. 10 класс.  
Лабораторные работы

210 шк. **Определение теплоемкости твердых тел и теплоты кристаллизации по скорости охлаждения образцов.** Составители: Киров С.А., Салецкий А.М., Харабадзе Д.Э., Ананьева Н.Г.,

238 шк. **Определение теплоёмкости жидкости.** Составители: Булкин П.С., Ананьева Н.Г., Ананьева М.С.

Учебное пособие /– М.: ООП Физ. фак-та МГУ, 2017, 24 с.

Эти две задачи объединены общей темой: изучением процессов нагревания веществ и их остывания за счет теплообмена. Основной теоретический материал, необходимый для подготовки к этим задачам, одинаков.

Идея эксперимента 210 задачи: при охлаждении образцов из разных материалов в одинаковых условиях скорости их охлаждения обратно пропорциональны теплоемкостям образцов, а теплота кристаллизации пропорциональна времени кристаллизации. Для калибровки и перехода к абсолютным значениям теплоемкостей и теплоты кристаллизации используется эталонный образец из материала известной теплоемкости.

В работе 328 проводится расчёт теплоёмкости воды из сравнения температурного хода нагревания разных объемов воды. Метод является абсолютным – не требуется сравнивать теплоемкость исследуемого вещества с теплоемкостью эталонного.

Пособие предназначено для школьников и школьных учителей. Излагаемый материал может быть использован для подготовки к выполнению задач общего физического практикума для студентов первого курса физического факультета МГУ.

Поскольку задача предназначена для школьников 10 класса, расчет погрешностей измерений предложено провести по упрощенной схеме.

*Цель работ: ознакомление с научными понятиями «теплота», «температура», «теплоемкость»; с основами теории теплообмена; примерами уравнений теплового баланса для экспериментального определения теплоемкости твердых тел и жидкости и теплоты кристаллизации.*

## Теория

**Термодинамическая система** – система, состоящая из столь большого числа частиц, что ее состояние можно описывать усредненными макроскопическими параметрами (такими как давление, температура, концентрация и др.).

**Внутренняя энергия.** Если в системе не происходит химических превращений, то внутренняя энергия – это энергия хаотического теплового движения: кинетическая энергия движения молекул, потенциальная энергия их взаимодействия, кинетическая энергия движения атомов в молекулах и потенциальная энергия их взаимодействия. **Температура** – это мера кинетической энергии хаотического движения молекул.

**Первое начало термодинамики** – закон изменения внутренней энергии (уравнение энергетического баланса):

в закрытой системе (с постоянным числом частиц) существуют два способа изменения внутренней энергии  $dU$  системы – теплообмен  $\delta Q$  (тепловое взаимодействие – более подробно см. стр. 5) и совершение системой работы  $\delta A$  (механическое взаимодействие):

$$dU = -\delta A + \delta Q. \quad (1)$$

**Теплота** (количество теплоты)  $\delta Q$  – это энергия в форме молекулярного движения, переданная без совершения работы.

**Элементарная механическая работа**, например, сил давления при расширении против сил внешнего давления – это работа, совершаемая системой при бесконечно малом изменении объема  $dV$ :

$$\delta A = p dV \quad (2)$$

**Теплоемкость** системы – отношение элементарного количества теплоты  $\delta Q$ , которое следует подвести к системе в определенном процессе, чтобы увеличить ее температуру на бесконечно малую величину  $dT$ , к этому изменению температуры (измеряется теплоемкость в Дж/град):

$$C_s = \frac{\delta Q}{dT}. \quad (3)$$

Теплоемкость единицы массы вещества называется **удельной теплоемкостью** и в дальнейшем обозначается как

$$c = \frac{\delta Q}{m dT} = \frac{1}{m} C_s. \quad (4)$$

где  $m$  – масса вещества.

В физике наиболее часто используется теплоемкость одного моля вещества (в дальнейшем записывается большой буквой  $C$  без индекса):

$$C = \frac{\delta Q}{\nu dT} = \frac{1}{\nu} C_s = M c, \quad (5)$$

где  $\nu$  – число молей вещества,  $M$  – молярная масса.

Теплоемкость зависит не только от вещества, но и от процесса, при котором подводится тепло. Если в этом процессе работа не совершается, т.е.  $V = \text{const}$ , теплоемкость определяется только внутренней энергией и обычно обозначается  $C_V$ . Зависимость  $C_V$  от температуры – это уникальная характеристика каждого вещества. На основании этой зависимости можно сделать выводы о строении молекул, их взаимодействии и энергии взаимодействия атомов в молекулах.

**Теплоемкость твердых тел.** Поскольку коэффициент теплового расширения твердых тел весьма мал, то можно считать, что для веществ в твердом состоянии теплоемкость при постоянном давлении  $C_p \approx C_V$ .

**Закон Дюлонга и Пти.** Дюлонг и Пти опытным путем в 1819 году получили и сформулировали правило, согласно которому молярная теплоемкость твердых тел близка к  $3R$  – примерно 25 (Дж/моль·К):

$$C = 3R, \quad (6)$$

где  $R$  – универсальная газовая постоянная.

Как показали дальнейшие исследования, этот закон дает хорошее соответствие с экспериментом для многих веществ в кристаллическом состоянии, но только при температурах выше определенного значения – Дебаевской температуры ( $T > T_D$ ), которая имеет свою величину для каждого вещества. Дюлонг и Пти проводили исследования примерно при комнатной температуре (15 °С – 100 °С).

Последовательная теория теплоемкости твердых тел возможна только в рамках квантовой теории (модели Эйнштейна и Дебая).

### **Теплота кристаллизации.**

**Кристаллизация** – процесс перехода вещества из жидкого состояния в твердое. Процесс кристаллизации связан с выделением количества теплоты, равного теплоте плавления. Для химически однородных веществ и некоторых сплавов процесс кристаллизации протекает при постоянной температуре, равной температуре плавления.

В процессе кристаллизации упорядочивается движение частиц жидкости, постепенно прекращается перемещение молекул, возникают связанные тепловые колебания относительно узлов кристаллической решетки.

Для начала кристаллизации необходимо, чтобы в жидкости имелись центры кристаллизации – неоднородности, вокруг которых начинается процесс

Значения молярной теплоемкости некоторых веществ при комнатной температуре (20 °С):

Элемент	$C$ , Дж/(К·моль)
Алюминий	25,7
Железо	26,8
Золото	26,6
Медь	24,7
Олово	27,8
Платина	26,3
Серебро	25,7
Йод	27,6
Кремний	19,4
Бор	10,5
Углерод (Алмаз)	5,7

Для алмаза, бора и кремния получается большое отклонение от закона Дюлонга и Пти, следовательно, комнатная температура для них не является достаточно высокой. Молярная теплоемкость алмаза приближается к 25 Дж/(К·моль) при температуре большей 1000°С.

образования твердой фазы. Если жидкость очень чистая и центры кристаллизации отсутствуют, то она может быть охлаждена до температуры более низкой, чем температура кристаллизации, но это состояние неустойчиво.

## Расчет теплоемкости

Существует много методов определения теплоемкости твердого тела и жидкости. В данных работах используются:

- 1. Метод сравнения кривых охлаждения эталонного и исследуемого образца** (210 задача). Измеряемый образец, нагретый до температуры, превышающей температуру окружающей среды, будет охлаждаться. Скорость охлаждения зависит от теплоемкости материала образца. Сравнивая кривые охлаждения – *термограммы* (зависимости температуры от времени) двух образцов, один из которых служит эталоном (его теплоемкость известна), можно определить теплоемкость другого.
- 2. Метод сравнения температурного хода нагревания разных масс исследуемого вещества** (238 задача). Метод является абсолютным – не требуется сравнивать теплоемкость исследуемого вещества с теплоемкостью эталонного.

Все расчеты, связанные с тепловыми процессами, выполняются на основании закона сохранения энергии (1-го начала термодинамики). Если рассматривать процессы, при которых работа не производится, то есть происходит только *теплообмен*, то пишут **уравнение теплового баланса**:

в *изолированной системе* сумма количеств теплоты, отданных всеми телами (внутренняя энергия которых уменьшается), равна сумме количеств теплоты, полученных всеми телами (внутренняя энергия которых увеличивается). Изменение энергии всех участвующих в теплообмене тел происходит до тех пор, пока не установится термодинамическое равновесие: температуры всех тел станут одинаковыми.

**Теплообмен (перенос тепла)** между телами или частями тел, имеющими разную температуру, может проходить за счет:

– **теплопроводности**: энергия передаётся от одной части тела к другой (или при непосредственном контакте двух тел) посредством теплового движения частиц (молекул, атомов, электронов вещества). При теплопроводности перенос вещества не происходит. Самая низкая теплопроводность у газов: молекулы расположены далеко друг от друга, а чтобы передать энергию, им необходимо столкнуться, поэтому процесс передачи энергии происходит достаточно медленно. У твердых тел теплопроводность выше, так как частицы расположены близко друг к другу. У металлов теплопроводность самая большая.

**Тепловой поток** от нагретого тела  $J = \Delta Q / \Delta t$  – это количество теплоты, которое проходит через некоторую площадь поверхности за единицу времени. Тепловой поток пропорционален разности между температурой поверхности образца  $T$  и температурой окружающей среды  $T_0$  (закон Ньютона):

$$J = \alpha(T - T_0). \quad (7)$$

$\alpha$  – коэффициент теплопередачи, который зависит от большого количества параметров и для него невозможно дать общую формулу. Поэтому на практике коэффициент теплопередачи определяется экспериментально.

– **конвекции** – это явление переноса энергии струями жидкостей или газов: перенос вещества и теплопроводность.

– **теплоизлучения** (например, между Солнцем и Землей): перенос тепловой энергии электромагнитными волнами (непосредственного контакта между телами нет).

Напишем **уравнение теплового баланса для охлаждения нагретого образца**. Если не учитывать излучение и считать, что теплоемкость и коэффициент теплопередачи постоянны, а окружающая среда бесконечна и однородна, уравнение теплового баланса для охлаждения образца будет иметь вид:

$$\delta Q = -Jdt \quad (8)$$

$\delta Q$  – внутренняя энергия тела изменяется за счет теплообмена (7) с окружающей средой (от нагретого тела идет тепловой поток). Или это можно записать:

$$cmdT = -\alpha(T - T_0)dt. \quad (9)$$

Метод определения теплоемкости в задаче 210 основан на измерении скорости охлаждения измеряемого образца (x) и эталонного (э) в некоторой температурной точке.

При одинаковых температурах нагретых образцов  $T_x = T_\varepsilon = T$  тепловой поток (7) от них будет одинаков:

$$c_x m_x \left( \frac{dT}{dt} \right)_x = c_\varepsilon m_\varepsilon \left( \frac{dT}{dt} \right)_\varepsilon = -\alpha(T - T_0),$$

откуда следует

$$c_x = c_\varepsilon \frac{m_\varepsilon}{m_x} \left( \frac{dT}{dt} \right)_\varepsilon / \left( \frac{dT}{dt} \right)_x. \quad (12)$$

Коэффициенты теплопередачи  $\alpha(T)$  могут зависеть от температуры, но для всех образцов предполагаются одинаковыми при одинаковой температуре и поэтому не влияют на результат. В данном методе требуется графически определить тангенс угла наклона касательных к термограммам разных образцов при одинаковых температурах.

Если исследуемое вещество находится в контейнере с известной массой  $m_K$ , который сделан из вещества с известной удельной теплоемкостью  $c_K$ , а их суммарная масса  $m_X$  и измеренная суммарная теплоемкость равна  $c_X$ , то удельная теплоемкость самого вещества  $c$  рассчитывается по формуле

$$c = c_X + \frac{m_K}{m} (c_X - c_K), \quad (13)$$

где  $m$  – масса исследуемого вещества в контейнере.

Напишем **уравнение теплового баланса для нагревания образца**, например, в стакан с водой помещаем нагреватель – вода греется. Но теплая вода остывает, потому, что температура в комнате ниже температуры воды. Мощность электрического нагревателя  $W=IU$ . Тогда энергия  $\delta Q$ , получаемая от нагревателя за **малое время  $dt$**  в некоторый момент времени  $t_1$  (рис.1), равна  $Wdt$ . Эта энергия расходуется на:

1. нагрев стакана и исследуемого вещества

– увеличение их температуры на  $dT_1$ :

$$cm dT_1 + H dT_1,$$

$c$  – удельная теплоёмкость воды,

$m$  – масса нагреваемой воды,

$H$  – теплоёмкость стакана с нагревателем,

2. теплообмен с окружающей средой (7)

$$\alpha(T_1 - T_0)dt,$$

$\alpha$  – коэффициент теплообмена,

$T_1$  – температура в капсуле с водой в некоторый момент времени  $t_1$  (рис.1),

$T_0$  – температура оболочки (комнатная).

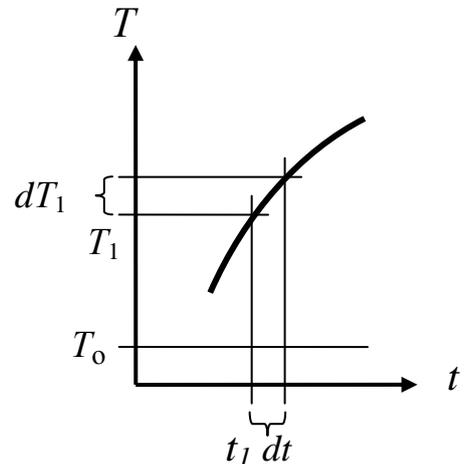


Рис. 1. Изменение температуры капсулы в процессе нагревания.

$$Wdt = cm dT_1 + H dT_1 + \alpha(T_1 - T_0)dt \quad (14)$$

Если изменение температуры нагреваемого образца небольшое: на 2-3 градуса от  $T_0$ , потери тепла в таких условиях незначительные, и мы можем пренебречь последним слагаемым в формуле (14) (оценка потери тепла в результате теплообмена калориметра с окружающей средой приведена в обработке результатов задачи 238):

$$W dt = cm dT_1 + H dT_1 \quad \text{или} \quad \frac{dT_1}{dt} = \frac{W}{cm+H} \quad (15).$$

Решение уравнения (15) имеет вид:  $T_1(t) = T_0 + \frac{W}{cm+H} t$ . (Решение уравнений (9) и (14), без вывода, приведены в приложении 1).

Таким образом, в приближении небольшого нагрева зависимость  $T_1(t)$  можно считать линейной. Наклон графика – скорость нагрева жидкости

$$G = \frac{dT}{dt} = \frac{W}{cm+H} \quad (16).$$

Рассмотрим процессы нагрева двух разных объемов воды (масс  $m_1$  и  $m_2$ ). Уравнение (16) для них можно записать в виде:

$$\begin{cases} cm_1 + H = \frac{W}{G_1} \\ cm_2 + H = \frac{W}{G_2} \end{cases} \quad (17).$$

Если мощность нагревателя в обоих случаях одинакова, из уравнений (17) следует выражение для удельной теплоемкости жидкости:

$$c = \frac{W \left( \frac{1}{G_1} - \frac{1}{G_2} \right)}{m_1 - m_2} \quad (18).$$

### Определение теплоты кристаллизации

На термограмме  $T(t)$  процессу кристаллизации вещества соответствует горизонтальный участок при температуре кристаллизации  $T_{кр}$  (АВ на рис.2).

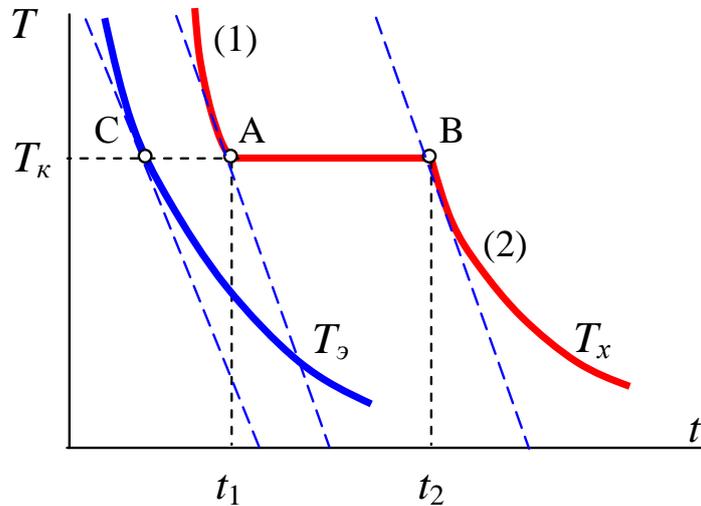


Рис.2. Термограммы охлаждения эталонного ( $T_э$ ) образца и измеряемого ( $T_x$ ) образца при наличии участка кристаллизации АВ.  
1 – участок охлаждения жидкой фазы, 2 – твердой фазы.

Ввиду постоянства температуры при кристаллизации тепловой поток  $J$  ( $T$ ) от кристаллизующегося вещества также можно считать постоянным за все время кристаллизации. Поэтому полное количество тепла, выделяющееся в процессе кристаллизации, пропорционально его длительности:

$$Q = J(T_{кр}) (t_2 - t_1). \quad (19)$$

Величину теплового потока  $J$  при температуре  $T_{кр}$  можно найти, поскольку он равен потоку от эталонного образца, взятого при той же температуре  $T = T_{кр}$ , (т.е. в точке С на рис.1), и согласно (9) он равен

$$J = -c_э m_э \left( \frac{dT_э}{dt} \right)_{T=T_{кр}}.$$

Отсюда для удельной теплоты кристаллизации получаем

$$q = \frac{Q}{m} = \frac{c_э m_э}{m} \left( \frac{dT_э}{dt} \right)_{T_{кр}} \cdot (t_2 - t_1). \quad (20)$$

Отметим, что при расчете  $q$  не надо учитывать теплоемкость материала контейнера, поскольку температура при кристаллизации постоянна.

### Экспериментальная аппаратура.

При создании приборов для измерения температуры – **термометров** используют то, что почти все физические свойства тел изменяются с температурой: при нагревании многие тела расширяются, электрическое сопротивление металлов возрастает, а полупроводников убывает, и т.д.

Соответственно, термометры бывают разные:

- Жидкостные (ртутные, спиртовые, ...), по ним определяют температуру по изменению объема жидкости (по высоте столбика в капилляре).
- Термометры сопротивления – изменение температуры определяют по изменению электрического сопротивления проволоки.

Есть и другие виды термометров (термисторы, термопары и др.). Различные типы термометров могут измерять температуры в разных интервалах.

Для каждой конкретной задачи термометр должен быть достаточно точен, он не должен изменять температуру тела, с которым приводится в контакт (должен быть достаточно мал). Важно, насколько быстро устанавливается термодинамическое равновесие термометра с измеряемым телом (это определяет время одного измерения).

Измерения температуры в данных задачах проводятся термопарой. **Термопара** – это два проводника из разных материалов, сваренных в местах соединений – рис. 3а. Для изготовления термопар чаще всего применяют медь, железо, платину, и некоторые сплавы: алюмель (95% Ni, остальное Al, Si, Mg), хромель (90% Ni, 10% Cr), платино-родий (90-70%Pt, 10-30% Rh), константан (примерно 60% Cu, 40% Ni, могут быть добавки Mg 1-2%), копель (56%Cu, 44%Ni). Термопары бывают разных типов в зависимости от пары металлов (обычно обозначают буквами – R, K, S и т.д.). Наибольшее распространение получили пары металлов хромель-алюмель (тип K), хромель-копель (тип L), платинородий-платина (тип S).

Характеристики некоторых термопар можно посмотреть в приложении 2.

Рассмотрим принцип работы термопары.

**Работа выхода** электрона из металла – это энергия, которую необходимо сообщить электрону для его удаления из объема твердого тела (иногда говорят, что электрону надо преодолеть потенциальный барьер для того, чтобы покинуть объем твердого тела). Работа выхода электронов в каждом из металлов различна, поэтому в месте соединения различных металлов – спае,

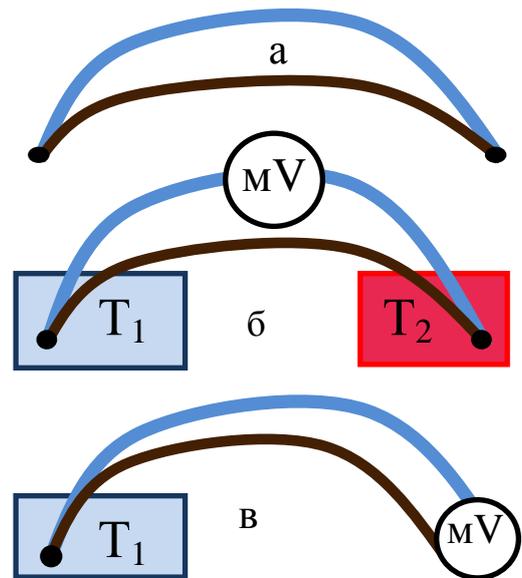


Рис. 3. Термопара.

возникает контактная разность потенциалов. Механизм возникновения этой разности потенциалов такой: электроны в приграничной зоне могут перемещаться между металлами. Покинув металл с меньшей работой выхода, электрону может не хватить энергии, чтобы вернуться назад: преодолеть большой потенциальный барьер. Поэтому металл с большей работой выхода «захватит» электрон и приобретет отрицательный заряд – но тогда работа выхода электрона из отрицательно заряженного металла уменьшится – потенциальный барьер уменьшится (для положительно заряженного металла работа выхода увеличится). Через некоторое время установится равновесие: металл с большей работой выхода «захватит» некоторое количество электронов, и работы выходов заряженных металлов сравняются. Но «захваченные» электроны соберутся в области контакта металлов (будут притягиваться к положительно зарядившемуся металлу): появится контактная разность потенциалов.

Работа выхода электронов, а, следовательно, и величина контактной разности потенциалов зависит от температуры спая. При одинаковой температуре обоих спаев контактные разности потенциалов одинаковы по абсолютной величине и противоположны по знаку – они компенсируют друг друга: ток по цепи не течёт. Но если нагреть один из спаев, в цепи появляется термо-ЭДС (рис. 3б). Величину термо-ЭДС в некотором диапазоне температур можно считать пропорциональной разности температур спаев  $T_1$  и  $T_2$ :

$U = S (T_1 - T_2)$ , где  $S$  – коэффициент Зеебека, или чувствительность термопары (Т. Зеебек – немецкий физик, открыл в 1821 году эффект термоэлектричества).

На термопаре измеряют ЭДС, пропорциональную разности температур между спаями, поэтому для измерения абсолютного значения температуры одного из спаев важно знать температуру второго спая. Для этого второй спай можно погрузить в ячейку с известным веществом в состоянии фазового перехода. Можно взять ячейку с кипящей жидкостью (например, вода, жидкий азот) или с плавящимся чистым веществом (например, вода со льдом).

Когда не требуется большая точность измерения температуры, в месте второго спая подключают милливольтметр (рис. 3в) и измеряют разность между неизвестной температурой  $T_1$  и температурой милливольтметра  $T_2$ , обычно комнатной, которая определяется каким-либо другим термометром.

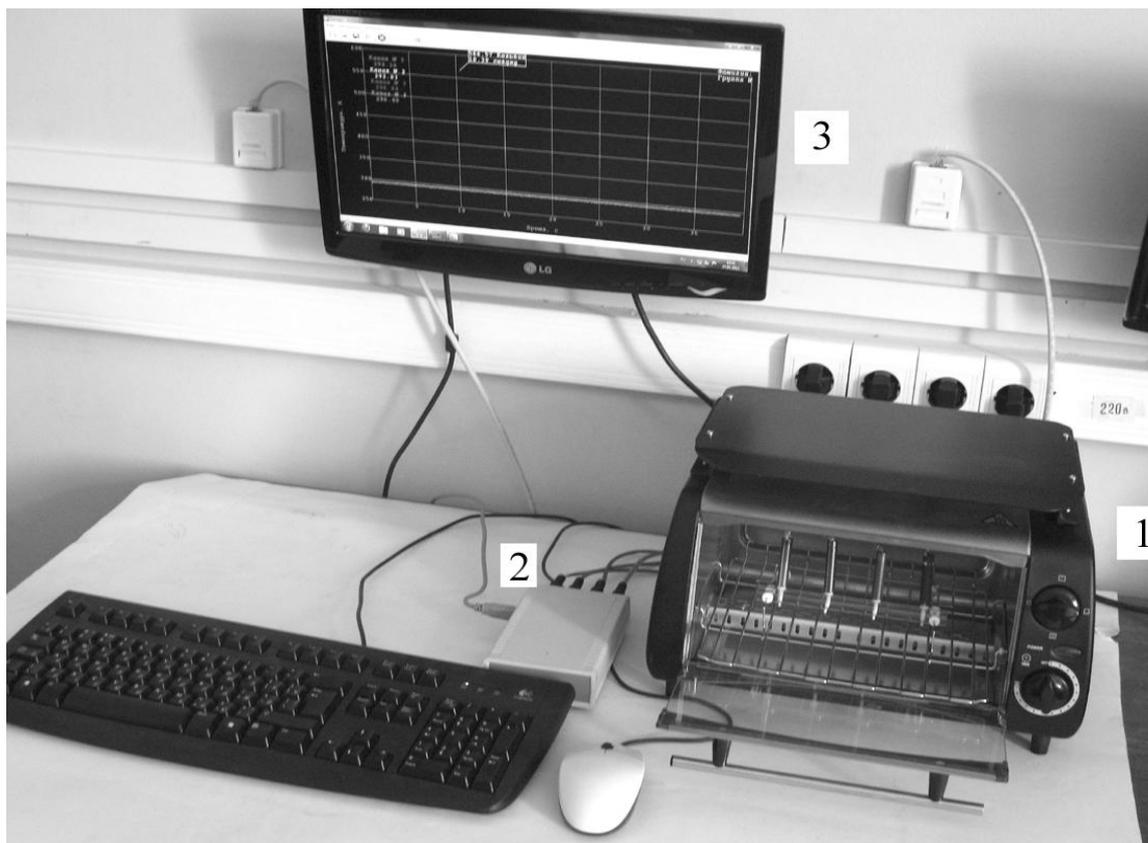
**Достоинства термопары:** большой диапазон измеряемых температур (от  $-200^\circ$  до  $+1800^\circ\text{C}$ ); малые размеры датчика; он быстро нагревается (время ожидания измерения мало); линейная зависимость термо-ЭДС от температуры (в большом диапазоне температур, порядка  $100-300^\circ$ ).

**Основная проблема измерения температуры термопарой** – малая величина термо-ЭДС (десятки мкВ/градус, см. приложение 2). Поэтому для измерений необходимо использовать очень чувствительные вольтметры (что дорого) или усилители. Для того чтобы увеличить значение измеряемого напряжения, в некоторых схемах соединяют последовательно несколько термопар.

## Лабораторная работа 210 шк. **Определение теплоемкости твердых тел и теплоты кристаллизации по скорости охлаждения образцов.**

### **Экспериментальная установка**

Внешний вид экспериментальной установки показан на *рис.4*. Она состоит из электрической печи (1), блока сопряжения термопар с персональным компьютером (2) и персонального компьютера (показан только монитор (3), клавиатура и мышь). Для измерения температуры используются термопары хромель-алюмель.



*Рис.4. Общий вид экспериментальной установки*

Электрическая печь (*рис.5*) обеспечивает нагрев до 300°C. Четыре образца имеют вид цилиндров одинакового размера. Их состав: графит (1), сталь (2), медь (3) и олово, помещенное в контейнер из титана или алюминия (4). Образцы закреплены на выдвижной раме (5), связанной с откидной стеклянной передней дверкой (6). Медный образец используется при измерениях в качестве эталонного. Удельная теплоемкость меди, а также титана и алюминия, из которых изготовлены контейнеры для олова, приведены в приложении 3. Массы образцов и масса контейнера для олова на каждой установке разные и указаны в окне рабочей программы на экране монитора. Управление электрической печью осуществляется ручкой таймера (7). К образцам прикреплены термопары, провода от которых выведены наружу с задней стороны печи и присоединены к блоку сопряжения с компьютером.



В левой части рабочего поля программы теми же цветами обозначены материалы образцов, их массы и их текущая температура.

В процессе измерений масштабы графика по осям времени и температур автоматически изменяются, так что на экране всегда виден весь график полностью от начала измерений. Масштабы по осям можно изменять вручную, если поставить указатель мыши на соответствующую ось и покрутить колесо мыши, а весь график можно переместить мышью при нажатой левой кнопке. Указатель курсора мыши сопровождается на экране выносной рамкой с текущими значениями координат в точке, указываемой концом стрелки.

## Проведение эксперимента

### *Подготовка к работе*

1. Включить монитор (нажать на кнопку в правом нижнем углу монитора). Если монитор находится в "спящем" режиме (кнопка мигает), нажимать на нее не нужно.

2. Включить системный блок, нажав на кнопку, находящуюся в его передней панели.

3. В процессе загрузки операционной системы появится меню выбора пользователя, в котором необходимо выбрать пункт «Студент» («stud moles»). После загрузки операционной системы запустить программу "Lab210": нужно дважды щелкнуть левой клавишей "мыши" по "иконке" данной программы



на рабочем столе.

После запуска программы на экране появляется диалоговое окно, в котором надо выбрать вариант «Начать новый эксперимент», далее в окне с двумя текстовыми полями ввести свою фамилию и класс. После подтверждения введенных данных кнопкой ОК на экране появляется основное окно программы (рис.6).

### *Начало работы*

Запустить режим регистрации данных, нажав зеленую кнопку  в меню программы.

Закрывать стеклянную откидную дверку печи и включить печь, повернув ручку таймера (нижняя ручка справа – 7 на рис.5) по часовой стрелке до упора. Убедиться, что нагревательные элементы внутри печи начинают светиться и температуры всех четырех образцов начинают расти.

Далее нужно, *не отходя от установки, контролировать весь процесс нагрева*, который занимает около 15..20 минут. Поскольку максимального времени, задаваемого таймером, может не хватить для нагрева печи до нужной температуры, то при приближении ручки таймера к нулю нужно снова повернуть ее по часовой стрелке приблизительно на половину шкалы.

**! В процессе нагрева корпус печи нагревается до высокой температуры, способной вызвать ожоги при прикосновении !**

Конец нагрева определяется условием: олово должно полностью расплавиться и температура контейнера с оловом немного, на 10...15 К, превысит температуру плавления. После этого печь нужно сразу выключить поворотом ручки таймера против часовой стрелки до упора на нуль. После выключения печи нужно ее полностью открыть, потянув за ручку на дверке (до перехода ее в горизонтальное положение).

**! Категорически запрещается продолжать нагрев печи свыше указанного предела. Перегрев приведет к необратимому повреждению элементов установки.**

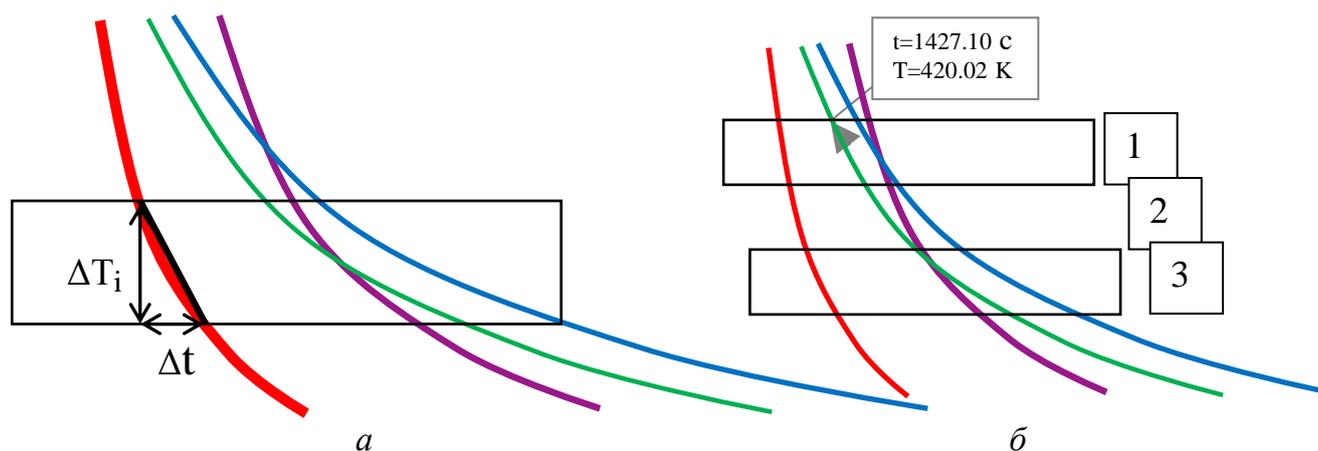
**! При открывании дверцы печи можно брать только за ручку. Прикосновение к самой раскаленной дверце приведет к ожогу !**

Далее начинается процесс охлаждения, который занимает около 20 минут. Примерный вид термограмм показан на *рис.б*. После достижения конечной температуры, при которой образец с меньшей температурой достигнет температуры порядка 320 К, выключить процедуру записи данных, нажав красную кнопку меню .

### *Запись результатов эксперимента*

Записать номер установки и данные измеряемых образцов, показанные в левой части рабочего окна: материал, масса, для образца с оловом – также масса и материал контейнера. Параметры образцов для всех установок приведены также в файле [Sample\\_parameters.pdf](#), вызываемом с рабочего поля на экране монитора.

Определить тангенс угла наклона касательной к термограммам можно графически, выбрав небольшую область изменения температур в окрестности температуры  $T_i$  (*рис. 7а*).



*Рис.7. Определение угла наклона термограммы образца.*

1. Нажать в меню кнопку режима выделения  и выделить курсором мыши **область охлаждения** для разницы температур 20 – 30 К (в районе 450 К или для температуры, указанной преподавателем), как показано рамкой 1 на *рис.7б*. Подводя курсор последовательно к точкам пересечения термограмм с

верхней границей рамки, снять показания времени, когда каждый образец достигает фиксированной температуры (заданной верхней границей рамки) и значение этой температуры. Записать в таблицу 1 (в таблицу занесены для примера некоторые температуры – запишите температуру верхней границы Вашей рамки).

Для измерения использовать привязанную к курсору табличку с его текущими координатами (рис.7б). Для точной установки курсора в нужную точку графика можно выбрать оптимальный увеличенный масштаб осей координат.

2. Провести аналогичные измерения для нижней границы рамки. Записать измерения в ту же таблицу.
3. Выделить курсором мыши **область охлаждения** для разницы температур 20 – 30 К (в районе 400 К), как показано рамкой 3 на рис.7б. Провести измерения, аналогичные п.1 и 2.

Таблица 1. Время фиксированной температуры для каждого образца.

N	T <sub>N</sub> , K	t, сек			
		№ 1, Графит	№ 2, Сталь	№ 3, Медь	№ 4, Олово
1	450				
2	420				
3	390				
4	370				

4. Измерить длительность процесса кристаллизации, т.е. горизонтального участка термограммы охлаждения образца с оловом. Для этого надо установить курсор на начало  $t_1$  и затем на конец этого интервала  $t_2$ , записать в тетрадь и найти разность  $t_2 - t_1$ . Если границы этого интервала не очень четкие или искажены имеющимся участком переохлаждения, то установить границу по точке пересечения экстраполированных прилегающих участков термограмм, как показано пунктиром на рис.8.
5. Рассчитать тангенс наклона кривой охлаждения медного образца при температуре кристаллизации олова можно по графику термограмм. Для этого с помощью курсора нужно измерить (и записать в тетрадь) координаты термограммы меди в окрестности температуры кристаллизации при температурах  $505 \pm 10 \dots 15$  К (рис.9).

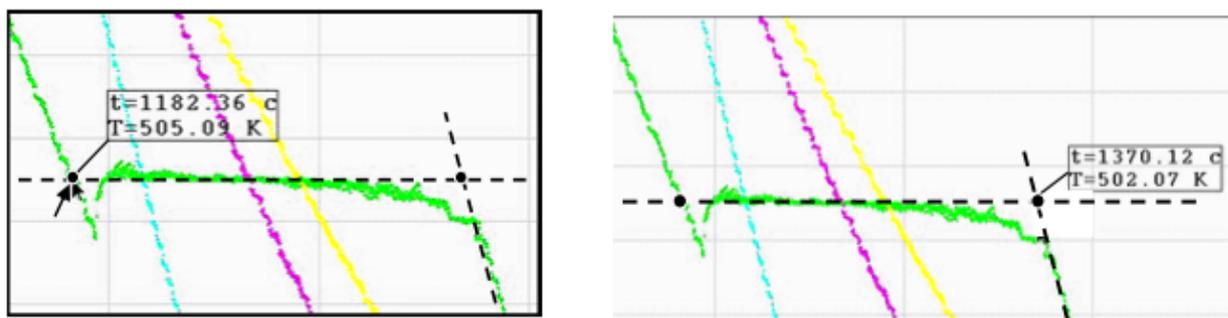


Рис.8. Измерение длительности участка кристаллизации. Слева стрелка показывает начало метастабильного участка переохлажденного жидкого олова.

6. По указанию преподавателя распечатать полученные графики с термограммами и включить их в отчет по задаче.

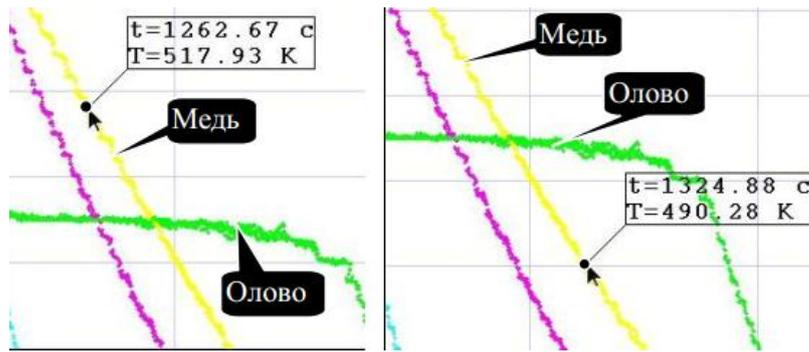


Рис.9. Измерение тангенса наклона термограммы меди около температуры плавления олова.

### Обработка результатов задачи 210

#### Расчет теплоемкостей

1. Рассчитать углы наклона кривых охлаждения  $\Delta T/\Delta t \approx dT/dt$  в зависимости от температуры для трех областей (рис.7б), записать в таблицу 2:

$$\Delta T_i = \Delta T_N - \Delta T_{N+1};$$

$$\Delta t_i = \Delta t_N - \Delta t_{N+1}.$$

Можно считать, что этот угол наклона термограммы соответствует средней температуре интервала  $T_i = (T_N + T_{N+1})/2$ .

Таблица 2. Расчет скорости охлаждения и теплоемкости образцов.

T <sub>i</sub> , К	№ 1, Графит			№ 2, Сталь			№ 3, Медь			№ 4, Олово		
	dT/dt мК/с	с Дж кг К	С Дж моль К									

2. Рассчитать по формуле (12) удельные теплоемкости материалов трех образцов 1, 2 и 4, использовать в качестве эталона образец меди (3). При нахождении теплоемкости олова учесть теплоемкость контейнера согласно (13). Затем найти молярные теплоемкости, записать в таблицу 2.

При расчете можно взять средние значения теплоемкости меди и материалов контейнеров Al и Ti, приведенные в приложении 3. Но для увеличения точности результата можно учесть их собственные зависимости от температуры, которые в используемом интервале близки к линейным. Соответствующие расчетные формулы также приведены в приложении 3.

3. Расчет погрешностей измерений можно провести по упрощенной схеме. Для этого воспользуемся следующими правилами:

- при сложении (вычитании) двух величин, известных с погрешностями, абсолютная погрешность суммы равна:  $\sigma_{A+B} = \sqrt{\sigma_A^2 + \sigma_B^2}$  (21).
- При умножении (делении) двух величин, известных с погрешностями, относительная погрешность произведения равна:  $\varepsilon_{A*B} = \sqrt{\varepsilon_A^2 + \varepsilon_B^2}$  (22).  
(Относительная погрешность:  $\varepsilon_A = \sigma_A/A$ )

Учитывая, что приборная погрешность измерения температуры  $\sigma_T = 2$  К, а времени  $\sigma_t = 5$  сек, оценить погрешность скорости остывания образцов:

$$\sigma_{\Delta T} = \sigma_T \sqrt{2};$$

$$\sigma_{\Delta t} = \sigma_t \sqrt{2};$$

$$\varepsilon_{\Delta T/\Delta t} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\Delta T}}{\Delta T}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\Delta t}}{\Delta t}\right)^2}.$$

Оценить относительную (потом и абсолютную) погрешность теплоемкости образцов:

$$\varepsilon_c = \sqrt{\varepsilon_{(\Delta T/\Delta t)_\Theta}^2 + \varepsilon_{(\Delta T/\Delta t)_X}^2}.$$

### ***Расчет удельной теплоты кристаллизации***

4. Рассчитать по формуле (20) удельную теплоту кристаллизации. Оценить погрешность теплоты кристаллизации аналогично пункту 3.

Далее в работе должны содержаться:

**Итоги работы:** полученные результаты с погрешностями.

**Выводы:** сравнить полученные результаты с законом Дюлонга и Пти (6) и со справочными данными. Проанализировать это сравнение.

### **Контрольные вопросы**

1. Первое начало термодинамики.
2. Что такое удельная и молярная теплоемкость вещества?
3. Теплота кристаллизации и метод ее измерения.
4. Виды теплопередачи и их особенности.
5. От чего может зависеть коэффициент теплообмена  $\alpha$  (7)?

## Лабораторная работа 238 шк. **Определение теплоёмкости жидкости.**

### **Описание установки**

**Калориметры** являются важнейшим прибором в физико-химических исследованиях. С помощью калориметра определяются количество тепла, выделившееся в капсуле с исследуемым веществом, и сопутствующее изменение температуры системы.

Калориметрическая система состоит из капсулы (используются также термины «ячейка», «гильза», «стакан») и внешней оболочки (см. *рис 10*). В капсуле размещается исследуемое вещество. В неё же можно поместить термометр и нагреватель. В зависимости от метода измерения могут использоваться оболочки: с вакуумной термоизоляцией, с большой теплоёмкостью, с нагревателем и без него.

Капсулы (стаканы) изготавливают обычно из вещества

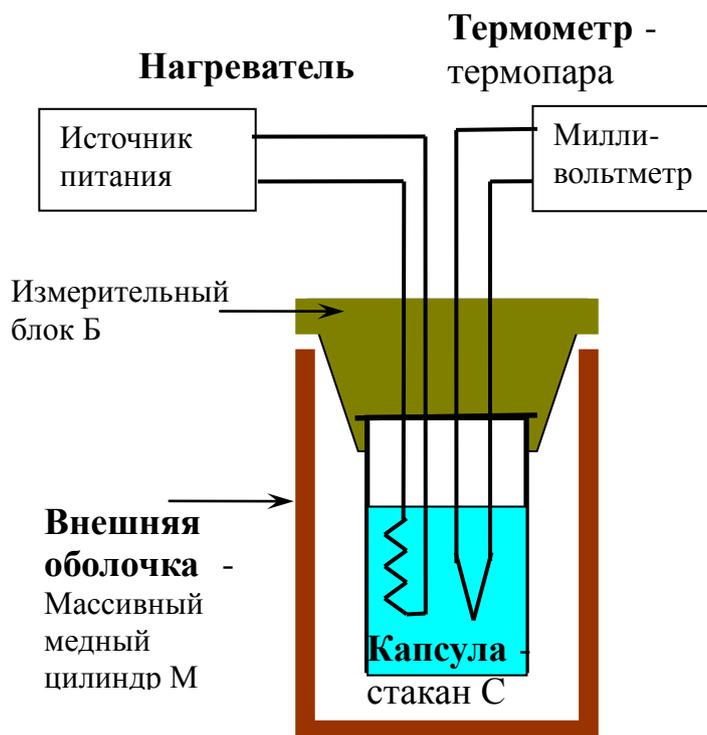
- с большой теплопроводностью – это необходимо для уменьшения разницы температур в разных точках системы;
- с малой теплоёмкостью – для уменьшения теплоёмкости капсулы по сравнению с теплоёмкостью образца.

Обычно капсулы изготавливают из меди, серебра или алюминия. Современные калориметры позволяют вести измерения с малыми количествами вещества 10–20 мг, а объём капсулы может быть 1–5 см<sup>3</sup> и менее.

Калориметр, используемый в задаче, состоит из металлического стакана – С (*рис.10*), в который надо налить воду, на стакан с водой сверху надеть измерительный блок Б. В блоке укреплены нагреватель и термопара, соединенная с милливольтметром. Нагреватель подключен к источнику напряжения (рекомендуемое для работы значение напряжения указано на установке). Стакан с измерительным блоком вставить в массивный цилиндр М, поддерживающий постоянную температуру воздуха вокруг стакана. Этим обеспечивается постоянство коэффициента теплоотдачи.

### **Порядок проведения эксперимента.**

На технических весах взвесьте капсулу-стакан (далее просто стакан). Запишите массу стакана  $M$  в подготовленную дома тетрадь (см. оформление результатов на следующей странице). Налейте в стакан воду комнатной



*Рис. 10. Блок-схема калориметра*

температуры до верхней отметки на стакане (примерно 200 мл). Взвесьте стакан с водой (запишите  $M_{общ1}$ ), определите массу воды  $m_1$ . Запишите в тетрадь. Запишите комнатную температуру по показаниям ртутного термометра  $T_k$ .

Включите милливольтметр с присоединенной к нему термопарой. Через 1 – 2 минуты запишите показания милливольтметра  $U_k$ .

Измерительный блок закрепите на стакане с помощью шпилек, входящих в пазы измерительного блока. Стакан с измерительным блоком вставьте в термостатирующий цилиндр.

Включите блок питания нагревателя. Рекомендованное для работы напряжение уже уставлено на блоке питания (указано на установке). Проверьте и запишите его:  $U_{пит}$ . **Во время всей работы это напряжение не изменять.** Измерьте силу тока через нагреватель  $I$ . После этого, но **не позднее, чем через 2 минуты после включения нагревателя,** измеряйте напряжение на термопаре каждые полминуты. Надо нагреть систему до показаний милливольтметра 600 мкВ, или до другого значения, заданного преподавателем (это займет примерно 15 – 25 минут). Все результаты записывайте в таблицу 1.

Выключите нагреватель.

Выньте стакан с водой из термостата и термометром измерьте конечную температуру воды  $T_{2\text{ воды}}$ . Вылейте воду.

Залейте новую массу воды  $m_2$  комнатной температуры (до нижней риски в стакане). Повторите опыт по предыдущей схеме. Результаты записывайте в таблицу 2. Оба объема воды надо нагреть до одной и той же температуры, время на это будет затрачено разное.

**Оформление результатов (подготовить дома в тетради):**

**Лабораторная работа 238 шк. Измерение теплоёмкости жидкости.**

**Краткий конспект теоретического материала.**

**Выполнение практической работы:**

Масса стакана  $M = \dots$

Комнатная температура и показания милливольтметра (комнатная температура):

$$T_k = \dots; U_k = \dots$$

Напряжение питания на нагревателе и сила тока через него:  $U_{пит} = \dots; I = \dots$

**Таблица 1.**

Температурный ход нагрева воды

$$M_{общ1} = \dots, \quad m_1 = \dots;$$

Конечная температура:  $T_{2\text{ воды}1} = \dots$

N	t, мин	U, мкВ	G <sub>1</sub> , g <sub>1</sub>
1	1		
2	1,5		G <sub>1</sub> = ... мкВ/мин = ... °C/сек
	...		
			g <sub>1</sub> = ... мкВ/мин = ... °C/сек

**Таблица 2.**

Температурный ход нагрева воды

$$M_{общ2} = \dots, \quad m_2 = \dots;$$

Конечная температура:  $T_{2\text{ воды}2} = \dots$

N	t, мин	U, мкВ	G <sub>2</sub> , g <sub>2</sub>

Далее в работе должны содержаться (оформить при обработке результатов):

**Обработка результатов:** формулы и расчеты по этим формулам (с расчетом погрешностей), графическое представление результатов.

**Итоги работы:** полученные результаты (с погрешностями).

**Выводы:** сравните, по возможности, полученные вами результаты со справочными данными и проанализируйте свой результат.

## Обработка результатов

1. По начальным и конечным показаниям вольтметра и ртутного термометра оцените чувствительность термопары (коэффициент пересчёта напряжения в температуру) –  $R$ .

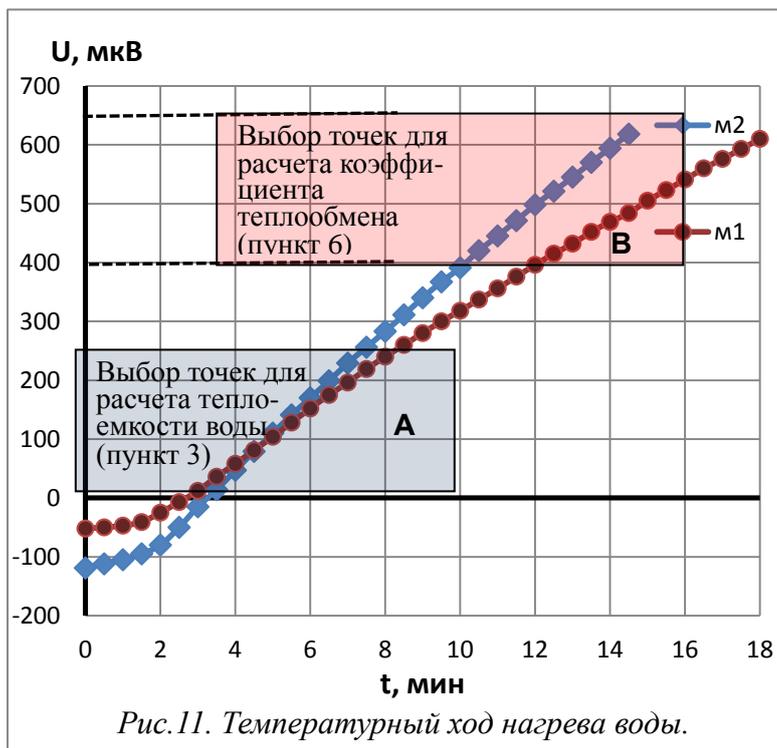
$$R = \frac{T_{\text{Г воды}} - T_{\text{К}}}{U_{\text{Г воды}} - U_{\text{К}}}$$

2. Постройте графики зависимости показаний милливольтметра от времени для двух масс воды (пример на рис.11). В начале эксперимента (1-3 мин) график будет существенно нелинейным, потому что некоторое время потребуется на разогрев самого нагревателя, но потом пойдет равномерный нагрев воды. При выводе формулы (18) мы пренебрегли потерями тепла в калориметре. Но график зависимости показаний милливольтметра от времени при нагревании воды только примерно можно считать прямой (даже при уже более или менее равномерном нагреве воды). Если провести прямые через первые 10 – 15 точек и конечные 10 – 15 точек графика для одной и той же массы воды, то их углы наклона (скорости изменения температуры) будут различны.

3. Выберите по графику по 10 - 15 точек на линейных участках кривых для каждой массы воды в области начала эксперимента (вблизи комнатной температуры  $T_{\text{к}}$ ) – когда теплообменом можно пренебречь. Определите скорость изменения температуры на линейных участках графика для каждой массы воды:

$$G^* = \frac{\Delta U}{\Delta t} \frac{\text{мкВ}}{\text{мин}}; \quad G = \frac{dT}{dt} = R \frac{\Delta U}{\Delta t} \frac{\text{град}}{\text{сек}},$$

запишите в таблицы. Оцените абсолютную погрешность скорости нагревания воды  $\sigma_G$  и относительную  $\varepsilon = \sigma_G / G$  (см п.3 обработки результатов задачи 210, формулы (21) и (22)).



4. Рассчитайте мощность нагревателя:  $W=IU$ . Оцените относительную погрешность мощности по формуле (абсолютные приборные погрешности измерения силы тока и напряжения приведены на установке):

$$\varepsilon_W = \sqrt{\varepsilon_U^2 + \varepsilon_I^2}$$

5. Рассчитайте теплоёмкость воды по формуле (18). Сравните значение полученной теплоёмкости с табличным значением (см. приложение 2).

6. Для оценки теплообмена установки с окружающей средой выберите 10 – 15 точек в конце эксперимента (в одном и том же интервале температур для обеих масс воды – см. *рис.11*, участок В). Определите скорость изменения температуры на этих линейных участках графика для каждой массы воды  $g_i$ , запишите в таблицы. Определите среднюю температуру на этом участке  $T_1$ .

Рассмотрим температурный ход нагрева воды одного объема. В достаточно малой окрестности температуры  $T_1$  (*рис.11*) можно представить часть кривой температурного хода отрезком прямой. Тогда мы можем предположить, что на этом участке температур (вблизи  $T_1$ ) теплообмен с окружающей средой примерно постоянный и равен  $\alpha(T_1 - T_0)dt$ . Перепишем уравнение теплового баланса (14) в виде:

$$W - \alpha(T_1 - T_0) = (cm + H) \frac{dT_1}{dt}.$$

Обозначим скорость нагрева воды в окрестности температуры  $T_1$  через  $g = \frac{dT_1}{dt}$  и выразим теплоемкость воды и капсулы с нагревателем из формулы (16):

$cm + H = W/g$ . Тогда можно оценить потери тепла в калориметре  $\alpha(T_1 - T_0)$  и коэффициент теплопередачи  $\alpha$ :

$$\alpha = \frac{W}{T_1 - T_0} \left(1 - \frac{g}{G}\right) \quad (6).$$

Оцените коэффициент теплопередачи  $\alpha$  для двух объемов воды, сравните значения.

7. Оцените теплоемкость стакана калориметра (с нагревателем)  $H$  из формулы (16).

8\*. Оцените погрешности расчетов: теплоёмкости воды, вычисленной по формуле (18), коэффициента теплопередачи  $\alpha$ .

Для расчета погрешностей воспользуйтесь правилами:

при сложении (вычитании) двух величин, известных с погрешностями, абсолютная погрешность суммы равна:  $\sigma_{A+B} = \sqrt{\sigma_A^2 + \sigma_B^2}$ .

При умножении (делении) двух величин, известных с погрешностями, относительная погрешность произведения равна:  $\varepsilon_{A*B} = \sqrt{\varepsilon_A^2 + \varepsilon_B^2}$ .

(Относительная погрешность:  $\varepsilon_A = \sigma_A/A$ )

### Контрольные вопросы.

1. Что такое теплоёмкость вещества?
2. Какова размерность удельной и молярной теплоёмкости?
3. Почему стакан калориметра выполнен из латуни или алюминия, а не из стекла или фарфора?

### Приложение 1.

Решение уравнения (14) – зависимость температуры нагреваемого образца с учетом потерь на теплообмен имеет вид:

$$T(t) = T_0 + \frac{W}{\alpha} \left( 1 - \exp\left(-\frac{at}{cm+H}\right) \right) \quad (23)$$

Для того, чтобы проанализировать это решение, надо вспомнить как выглядит график зависимости  $Y(X) = 1 - \exp(-X)$  (см. рис. 12). С учетом коэффициентов формулы (23), на рис. 13 представлен график зависимости изменения температуры от времени при нагревании, например, воды, с учетом потерь тепла в окружающую среду за счет теплообмена. Если у нас маломощный нагреватель, вода никогда и не закипит: ее температура установится

$$T(t) = T_0 + \frac{W}{\alpha} < 100^\circ\text{C}.$$

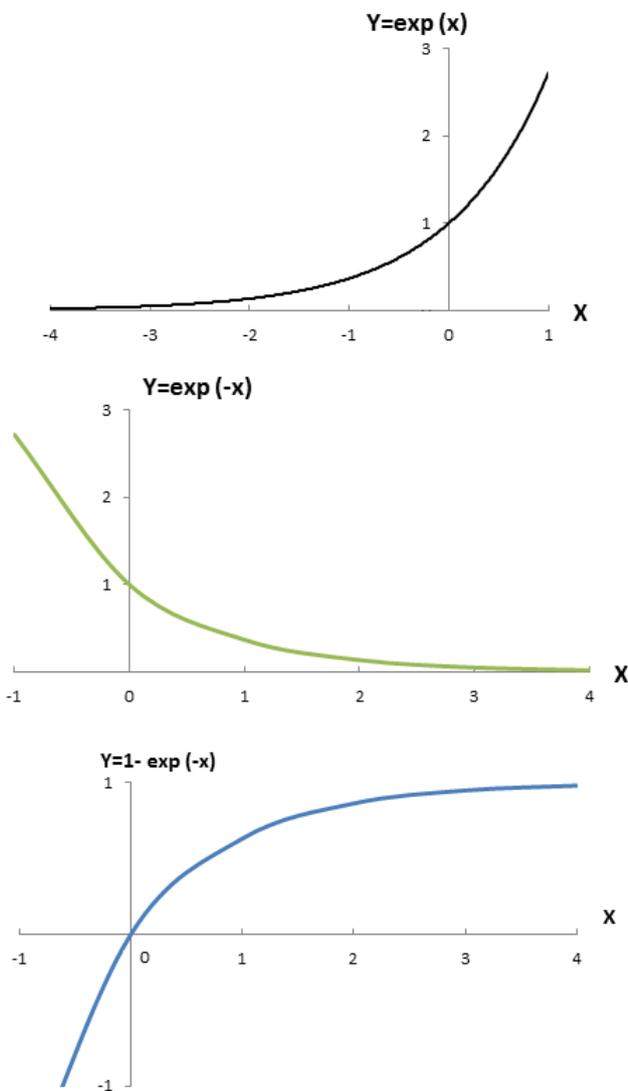


Рис.12. Графическое представление некоторых экспоненциальных зависимостей.

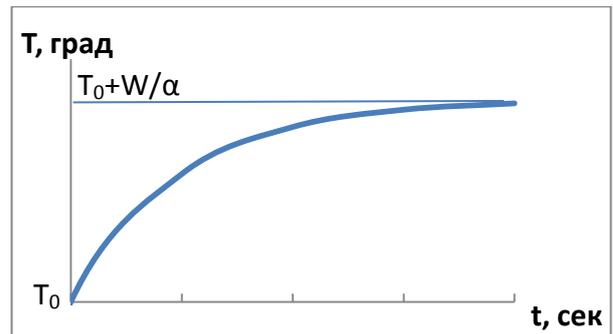


Рис.13. График зависимости температуры нагреваемого образца от времени с учетом теплообмена (23).

Решение уравнения (9) – зависимость температуры охлаждения образца за счет теплообмена имеет вид (рис.14):

$$T(t) = (T_1 - T_0)e^{-t/\tau} + T_0,$$

где  $T_1$  – начальная температура,  $\tau = \alpha/mc$  – время тепловой релаксации,  $c$  – удельная теплоемкость тела,  $m$  – его масса.

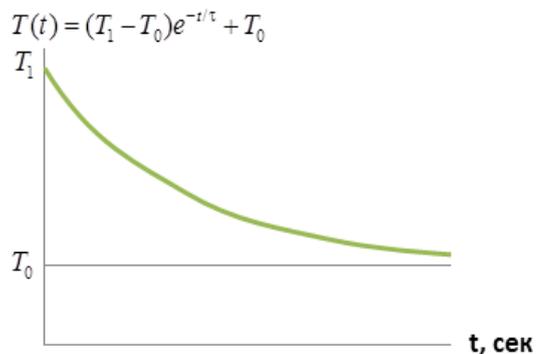


Рис.14. Зависимость температуры от времени при охлаждении образца.

## Приложение 2.

Характеристики некоторых термопар.

Материал положительного электрода	Материал отрицательного электрода	Максимальная температура, °C	Чувствительность, мкВ/град
Железо <i>Fe</i>	Константан <i>Cu-Ni</i>	760	51–65
Хромель <i>Cr-Ni</i>	Алюмель <i>Ni-Al</i>	1300	Около 40
Медь <i>Cu</i>	Константан <i>Cu-Ni</i>	400	40–60
Хромель <i>Cr-Ni</i>	Константан <i>Cu-Ni</i>	1000	60–80
Платино-родий <i>Pt-Rh</i> (10–30% <i>Rh</i> )	Платина <i>Pt</i>	1100–1800	5–14

Теплоёмкость и плотность некоторых жидкостей.

<i>вещество</i>	$c_p$ , кДж/(кг·C)	$\rho$ , $10^3$ кг/м <sup>3</sup>
Ацетон 20 °C	2,22	0,791
Бензин 20 °C	2,09	0,68 – 0,72
Вода чистая 0 °C	4,218	0,99987
10 °C	4,192	0,99973
20 °C	4,182	0,99823
40 °C	4,178	0,99224
60 °C	4,184	0,98824
80 °C	4,196	0,97183
100 °C	4,216	0,95838
Рассол 30 % соли -10 °C	2,64-2,72	1,75
Глицерин 20 °C	2,43	1,26
Ртуть 20 °C	0,138	13,55

## Приложение 3.

Средние теплоемкости в диапазоне температур 300...500 К (кДж/(кг·К)).

Медь	Титан	Алюминий
405	543	927

Аппроксимации температурных зависимостей теплоемкости меди, алюминия и титана в диапазоне 300...500 К (температура в кельвинах):

$$\text{Cu: } c = 0,100 T + 360 \text{ кДж/(кг К)}$$

$$\text{Al: } c = 0,442 T + 771 \text{ кДж/(кг К)}$$

$$\text{Ti: } c = 0,242 T + 457 \text{ кДж/(кг К)}$$