



Московский Государственный Университет
им. М. В. Ломоносова.

Физический факультет.

Кафедра общей физики.

Общий Физический практикум для школьников.
(молекулярная физика)

Лабораторная работа 238 шк

измерение теплоёмкости жидкости

Москва 2017

Измерение теплоёмкости жидкости. Лабораторная работа 238 шк (практикум «Молекулярная физика и термодинамика» для школьников). Учебное пособие / Составители П.С. Булкин, М.С. Ананьева, Н.Г. Ананьева – М.: ООП Физ. фак-та МГУ, 2017, 12 с.

В настоящей работе проводится расчет 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.

Цель работы:

- из сравнения температурного хода нагревания разных объемов воды рассчитать теплоёмкость воды;
- познакомиться с измерительными приборами: термодинамическим термометром и калориметром.

Введение.

По *молекулярно-кинетической теории* все макроскопические тела состоят из атомов и молекул, которые непрерывно хаотически движутся и взаимодействуют друг с другом. *Внутренняя энергия* – это кинетическая энергия хаотического (теплого) движения частиц вещества и потенциальная энергия их взаимодействия. Кинетическая энергия движения атомов и молекул определяет **температуру** тела.

Количество теплоты Q – численное выражение переданной телу внутренней энергии при теплообмене, измеряется в *Дж*.

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.

– **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). Теплоизлучение описывается законом Стефана-Больцмана:

$\delta Q / \delta t = \sigma \varepsilon s (T_1^4 - T^4)$, где $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}$ – постоянная Стефана-Больцмана, s и ε – площадь поверхности и коэффициент поглощения нагреваемого тела, T_1 и T – температуры горячего и холодного тел;

Отношение количества теплоты, полученной телом при нагревании (или отданное при охлаждении), к изменению его температуры называют **теплоемкостью тела**:

$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta t},$$

ΔQ – количество теплоты, полученное веществом при нагреве (или выделившееся при охлаждении),

Δt – разность конечной и начальной температур.

Измеряется теплоемкость в *Дж/град*.

Удельная теплоемкость – это теплоемкость единичной массы вещества – отношение теплоемкости к массе m : $c = \frac{\Delta Q}{m \Delta t}$.

Молярная теплоемкость – это теплоемкость 1 моля вещества $c_v = \frac{\Delta Q}{\nu \Delta t}$, ν – количество молей вещества в нагреваемом (охлаждающемся) образце.

Теплоемкость зависит от рода вещества, от его агрегатного состояния, от температуры (как правило, уменьшается при понижении температуры). Для газов теплоемкость существенно зависит от вида процесса (теплоемкость газа при изобарическом процессе c_p значительно отличается от теплоемкости при изохорическом процессе c_v). Но, поскольку при небольших изменениях температуры удельная теплоемкость изменяется незначительно, если агрегатное состояние сохраняется, то во многих задачах можно считать теплоемкость постоянной.

Уравнение теплового баланса. Все расчеты, связанные с тепловыми процессами, выполняются на основании закона сохранения энергии (1-го начала термодинамики). Если рассматриваются такие 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.

Напишем **уравнение теплового баланса** для данной задачи. В капсулу с водой помещаем нагреватель – вода греется. Но теплая вода остывает, потому, что температура окружающей среды ниже температуры воды.

Мощность нагревателя $W=IU$. Тогда энергия Wdt , получаемая от нагревателя за **малое время dt** в некоторый момент времени t_1 (рис.1), расходуется на:

- нагрев капсулы 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 капсулы с нагревателем,
- теплообмен с окружающей средой
 $\alpha(T_1 - T_0)dt$,
 если $dT_1 \ll T_1 - T_0$;
 α – коэффициент теплообмена,
 T_1 – температура в капсуле с водой в некоторый момент времени t_1 (рис.1),
 T_0 – температура оболочки (комнатная).

$$Wdt = cm dT_1 + H dT_1 + \alpha(T_1 - T_0)dt \quad (1)$$

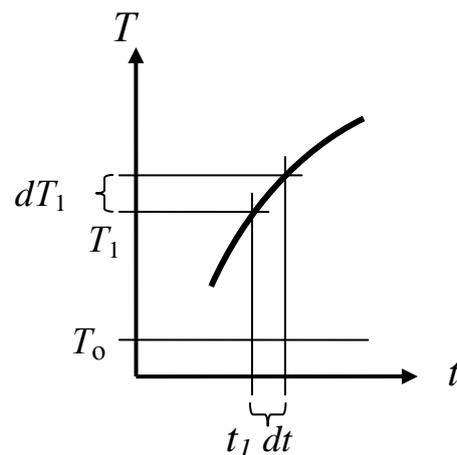


Рис. 1. Изменение температуры капсулы в процессе нагревания.

Изменение температуры нагреваемого образца в данной задаче небольшое: 3-5 градусов, потери тепла в таких условиях незначительные, и мы можем

пренебречь последним слагаемым в формуле (1) (оценка потери тепла в результате теплообмена калориметра с окружающей средой приведена в обработке результатов):

$$W dt = cm dT_1 + H dT_1 \quad \text{или} \quad \frac{dT_1}{dt} = \frac{W}{cm+H} \quad (2).$$

Решение уравнения (2) имеет вид: $T_1(t) = T_0 + \frac{W}{cm+H} t$. (Решение уравнения (1), без вывода, приведено в приложении 1).

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

$$G = \frac{dT}{dt} = \frac{W}{cm+H} \quad (3).$$

Рассмотрим процессы нагрева двух разных объемов воды (масс m_1 и m_2). Уравнение (3) для них можно записать в виде:

$$\begin{cases} cm_1 + H = \frac{W}{G_1} \\ cm_2 + H = \frac{W}{G_2} \end{cases} \quad (4).$$

Если мощность нагревателя в обоих случаях одинакова, из уравнений (4) следует выражение для удельной теплоемкости жидкости:

$$c = \frac{W\left(\frac{1}{G_1} - \frac{1}{G_2}\right)}{m_1 - m_2} \quad (5).$$

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 приводятся в контакт (должен быть достаточно мал). Важно, насколько быстро устанавливается термодинамическое равновесие термометра с измеряемым телом (это определяет время одного измерения).

Измерения температуры в данной задаче проводятся термопарой. **Термопара** – это два проводника из разных материалов, сваренных в местах соединений – рис. 2а. 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 электронов¹ в каждом из металлов различна, поэтому в месте соединения – спае, возникает контактная разность потенциалов. Работа выхода электронов, а, следовательно, и величина контактной разности потенциалов зависит от температуры спае. 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. 2б). 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 спае. 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 спае подключают милливольтметр (рис. 2в) и измеряют разность между T_1 и температурой милливольтметра T_2 , обычно комнатной, которая определяется каким-либо другим термометром.

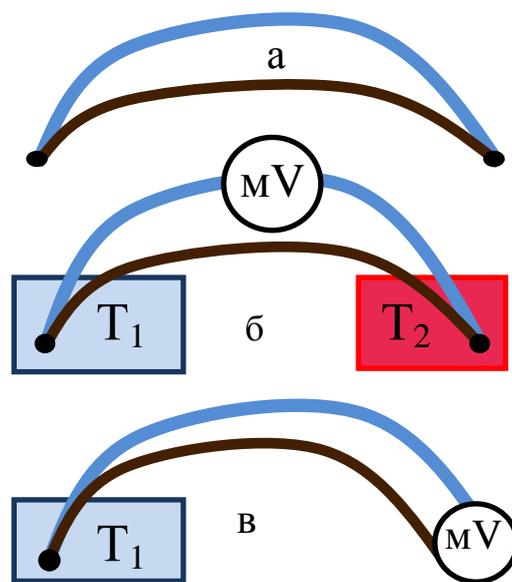


Рис. 2. Термопара.

¹ **Работа выхода** — энергия, которую необходимо сообщить электрону для его удаления из объёма твёрдого тела.

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

Основная проблема измерения температуры термопарой – малая величина термо-ЭДС (единицы – десятки мкВ/градус, см. таблицу ниже). 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.

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 собственно калориметра – капсулы (используются также термины «ячейка», «гильза», «стакан») и внешней оболочки (см. рис 3). 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;
- 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 $10\text{--}20$ мг, а объём капсулы может быть $1\text{--}5$ см³ и менее.

Описание установки.

Измерения проводятся с помощью калориметра (см. рис. 3). Калориметр состоит из металлического стакана – С, в который мы наливаем воду, на стакан с водой сверху надеваем измерительный блок Б. В блоке укреплены нагреватель

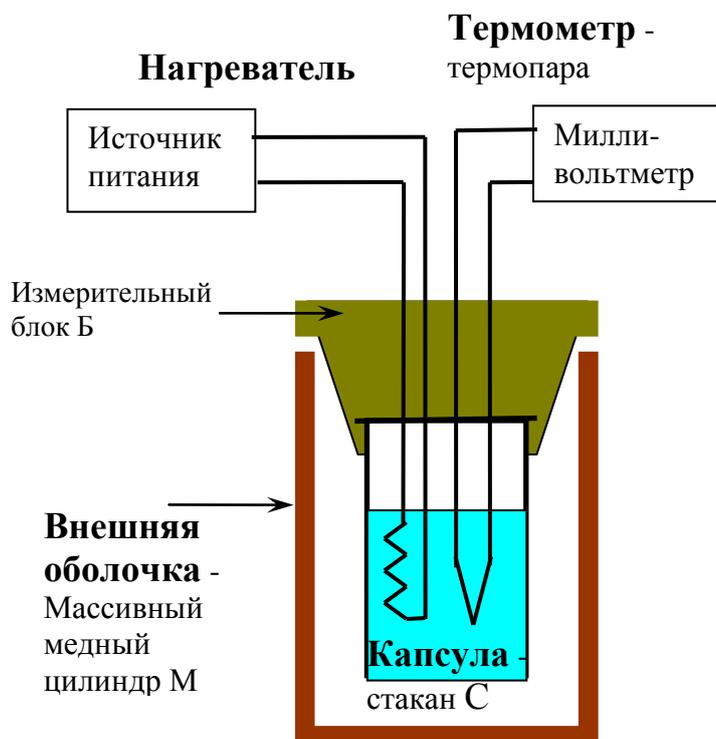


Рис. 3. Блок-схема калориметра

и термopара, соединенная с милливольтметром. Нагреватель подключен к источнику напряжения (рекомендуемое для работы значение напряжения указано на установке). стакан с измерительным блоком вставляем 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 внизу страницы). Налейте в стакан воду комнатной температуры до верхней отметки на стакане (примерно 200 мл). Взвесьте стакан с водой (запишите $M_{общ}$), определите массу воды m_1 . Запишите в тетрадь. Запишите комнатную температуру по показаниям ртутного термометра T_k .

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

Измерительный блок закрепите на стакане с помощью шпилек, входящих в пазы измерительного блока. Надо следить за тем, чтобы метки на крепёжных шпильках стакана и на корпусе измерительного блока совпадали. стакан с измерительным блоком вставьте в термостатирующий цилиндр.

Включите блок питания нагревателя. Рекомендованное для работы напряжение уже выставлено 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 2-3 минуты после включения нагревателя,** измеряйте напряжение на термopаре каждые полминуты. Надо нагреть систему на 4-6 градусов – до показаний милливольтметра 600 мкВ, или до другого значения, заданного преподавателем (это займет примерно 10 – 20 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 для разных объемов воды.

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 при комнатной температуре: $T_k = \dots$; $U_k = \dots$

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 ₁ , g ₁
1	1		
2	1,5		G ₁ = ... мкВ/мин = ... °C/сек
	...		
			g ₁ = ... 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 ₁ , g ₁

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 пересчета напряжения в температуру) – R . Сравните с данными, приведенными на установке. В дальнейших расчетах используете чувствительность термопары R , приведенную на установке.

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

2. Постройте графики зависимости показаний милливольтметра от времени для двух масс воды (пример на рис.4). 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 (2) мы пренебрегли потерями тепла в калориметре. Но график зависимости показаний милливольтметра от времени при нагрева-

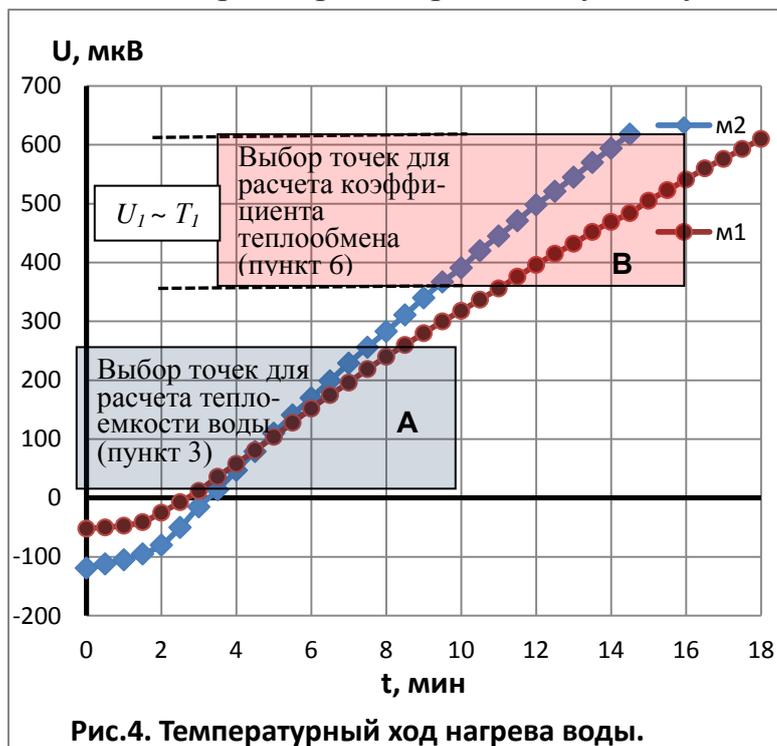


Рис.4. Температурный ход нагрева воды.

нии 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_k) – когда теплообменом можно пренебречь. Определите скорость изменения температуры на линейных участках графика для каждой массы воды (желательно методом наименьших квадратов):

$G^* = \frac{\Delta U}{\Delta t} \frac{\text{мкВ}}{\text{мин}}$; $G = \frac{dT}{dt} = R \frac{dU}{dt} \frac{\text{град}}{\text{сек}}$, запишите в таблицы. Оцените абсолютную погрешность скорости нагревания воды (σ_G) и относительную ($\varepsilon = \sigma_G / G$).

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 (5). 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.4, участок В). Определите скорость изменения температуры на этих линейных участках графика для каждой массы воды g , 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.4) 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 (1) 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 (3): $cm + H = W/G$. Тогда можно оценить потери тепла в калориметре $\alpha(T_1 - T_0)$ и коэффициент теплопередачи α :

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

Оцените коэффициент теплопередачи α для обоих объемов воды, сравните значения.

7. Оцените теплоемкость стакана калориметра (с нагревателем) H из формулы (3).

8*. Оцените погрешности расчетов: теплоёмкости воды, вычисленной по формуле (5), коэффициента теплопередачи α .

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: $\varepsilon_{A*B} = \sqrt{\varepsilon_A^2 + \varepsilon_B^2}$.

Контрольные вопросы.

1. Что такое теплоёмкость вещества?
2. Какова размерность удельной и молярной теплоёмкости?
3. Почему вся система для измерения заключена в термостат?
4. Почему корпус оболочки термостата сделан из меди, а не из стали?
5. Почему стакан калориметра выполнен из латуни или алюминия, а не из стекла или фарфора?

Приложение 1.

Решение уравнения (1) имеет вид:

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

Или, если рассматривать разницу изменяющейся температуры от комнатной:

$$\theta(t) = T(t) - T_0 = \frac{W}{\alpha} \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right) \quad (6),$$

где $\tau = (cm+H)/\alpha$ – называют *временем релаксации*.

На рис. 4 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 $T(t) = T_0 + \frac{W}{\alpha} < 100^\circ\text{C}$: в формуле (6) если время наблюдения достаточно большое, то значение $\exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$ стремится к нулю. Время установления стационарного режима оценивают через время релаксации: время, в течении которого система придет в состояние с температурой, отличной от стационарной θ_0 , в e (примерно 2,7) раз.

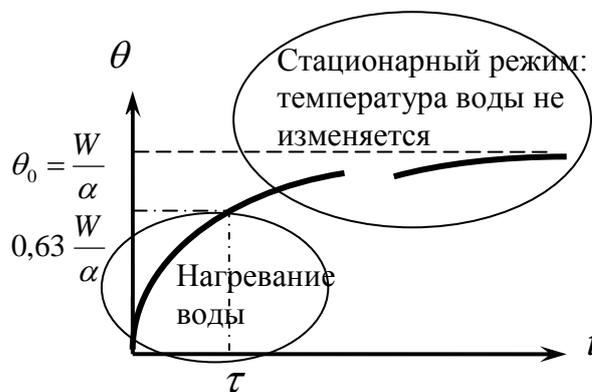


Рис. 4. Изменение температуры воды при нагревании. Вид зависимости (6).

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 жидкостей.

вещество	c_p , кДж/(кг·C)	ρ , 10 ³ кг/м ³
Ацетон	2,22	0,791
Бензин	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 20 % соли -10 °C	3,06	1,12
Рассол 30 % соли -10 °C	2,64-2,72	1,75
Глицерин	2,43	1,26
Ртуть	0,138	13,55
Спирт метиловый	2,47	0,792
Спирт этиловый	2,4	0,79

Теплоёмкость и теплопроводность некоторых твёрдых веществ.

вещество	ρ , 10 ³ кг/м ³	c_p , кДж/(кг·C) при 20 °C	теплопроводность, коэффициент λ , Вт/(м·град)
алюминий	2,7	0,88 – 0,93	237 (сплавы 120 – 180)
железо	7,88	0,44	74
латунь	8,4 – 8,7	0,38	86
медь	8,93	0,39	390
сталь	7,7 – 7,9	0,46	45
стекло	2,2 – 2,6	0,7 – 1,0	0,4 – 1,1
фарфор	2,2 – 2,5	0,8 -1,5	1,0 – 1,2