

5. Контрольные вопросы.

1. Расскажите о возможных способах передачи теплоты.
2. В чём суть явления теплопроводности? Какая величина переносится при теплопроводности?
3. Какая величина называется тепловым потоком? В каких единицах СИ она измеряется?
4. Какой формулой описывается поток теплоты, перенесенной при теплопроводности?
5. Каков физический смысл коэффициента теплопроводности? В каких единицах СИ измеряется эта величина?
6. Напишите формулу для коэффициента теплопроводности идеального газа. От каких величин он зависит?
7. Объясните понятие градиента температуры.
8. В чём заключается метод нагретой нити для определения коэффициента теплопроводности газов?
9. Выведите расчётную формулу для определения коэффициента теплопроводности методом нагретой нити.
10. Объясните назначение эталонного резистора в схеме экспериментальной установки.
11. Как определяется разность температур проволоки и наружной трубки в данной работе?
12. Как оценить среднюю длину свободного пробега и эффективный диаметр молекулы газа, используя явление теплопроводности?

Литература.

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т.1.-М.: Наука, 1987, - 432с. (§§ 128,131).
2. Кикоин И.К., Кикоин А.К. Молекулярная физика. - М.: Наука, 1963, - 500с. (Гл 3, § 7).

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ КАЛОРИМЕТРА И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОЁМКОСТИ ВОЗДУХА ПРИ ПОСТОЯННОМ ДАВЛЕНИИ

1. Цель работы:

- 1) расчет теплового эквивалента калориметра (Θ);
- 2) определение теплоёмкости воздуха при постоянном давлении.

2. Теоретические основы работы.

Количество теплоты, необходимое для нагревания газа зависит от количества нагреваемого газа и от того, на сколько градусов должна быть изменена его температура и при каких условиях это изменение происходит. Поэтому для характеристики тепловых свойств газов, как и всяких других тел пользуются особой величиной - теплоёмкостью.

Теплоёмкостью тела называется количество тепла, которое нужно подвести к нему или отнять от него для изменения его температуры на 1 К.

Если при нагревании постоянным остаётся давление, то теплоёмкость называется теплоёмкостью при постоянном давлении c_p :

$$c_p = dQ/dT \quad (1).$$

2.1 Описание работы калориметра.

Для непосредственного измерения количества теплоты, отданного или полученного телом, служат специальные приборы - калориметры. В наиболее простой своей форме калориметр представляет собой сосуд, заполненный веществом, теплоёмкость которого хорошо известна, например водой (удельная теплоёмкость 4,2 кДж/кг·К).

Измеряемое количество теплоты тем или иным путём передаётся калориметру, в результате чего изменяется его температура. Измерив это изменение температуры ΔT , мы получим теплоту Q :

$$Q = cm \Delta T, \quad (2)$$

где c - удельная теплоёмкость вещества, заполняющего калориметр, m - его масса.

Необходимо учитывать, что теплота передаётся не только веществу калориметра, но и сосуду и различными устройствам, которые могут в нём помещаться. Поэтому перед измерением нужно определить так называемый тепловой эквивалент калориметра (Σ) - количество теплоты, нагревающее "пустой" калориметр на один градус.

2.2 Метод Графического учёта потерь тепла.

Точное определение теплоёмкости вызывает некоторые затруднения вследствие неизбежного теплообмена с окружающей средой. Термостагирование калориметра снижает теплообмен, но не может свести его к нулю.

Расчёт поправок проще, если теплообмен идёт в одном направлении. Удобнее, чтобы температура калориметра была выше температуры окружающей среды, что легко осуществить немного подогрев исследуемую жидкость, тогда в течение всего опыта калориметр только отдаёт тепло окружающей среде.

Расчетная формула для определения теплового эквивалента может быть получена из уравнения теплового баланса:

$$Q = (\Delta T + \Theta) (mc + \Sigma), \quad (3)$$

где $Q = I U t$ - количество теплоты, полученное калориметром от электрического нагревателя, I - сила тока в Амперах, U - напряжение в Вольтгах,

$t = (t_2 - t_1)$ - время действия нагревателя в секундах; $\Delta T = (T_2 - T_1)$ - измеренное повышение температуры калориметра с жидкостью (водой), T_1 - начальная температура в момент включения нагревателя, T_2 - конечная максимальная температура опыта, Θ - поправка, учитывающая теплообмен, m - масса воды, находящейся в калориметре, c - её удельная теплоёмкость. Тогда, тепловой эквивалент калориметра равен:

$$\Sigma = I U t / (\Delta T + \Theta) - mc, \quad (4)$$

Для правильного определения ΔT , Θ и Σ следует воспользоваться графиком температурного хода калориметра. Из-за теплообмена температура калориметра представляется собой сложную функцию времени (рис. 1).

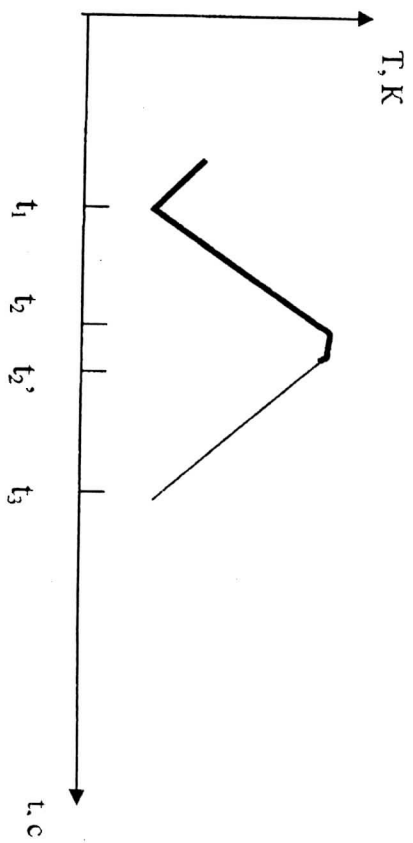


Рис. 1. График температурного хода калориметра.

В интервале от t_1 до t_2 идёт главный период -калориметр получает от нагревателя больше тепла, чем отдаёт вследствие теплообмена; t_2 - момент выключения нагревателя, но из-за тепловой инерции максимальная температура T_2 достигается позднее - в момент t_2 . В интервале от t_2 до t_3 (выключение секундомера, конец опыта) идёт конечный период - охлаждение в результате теплообмена от максимальной температуры T_2 до конечной T_3 .

6.2.1. Расчёт поправки Θ . При точных калориметрических измерениях вводится ряд различных поправок, но в данной работе можно ограничиться только температурной поправкой, обусловленной теплообменом. Всё тепло Q , полученное системой «жидкость-калориметр» от нагревателя делится на две части: Q_1 - тепло, идущее на нагревание системы от T_1 до T_2 , и q - тепло, отдаваемое системой окружающей среде (термостату). Без этой потери систем а нагрелась бы на $\Delta T_1 = \Delta T + \Theta$, где $\Delta T = T_2 - T_1$. Количество тепла, отдаваемое системой в течение главного периода в следствие теплообмена с окружающей средой, можно определить по закону Ньютона:

$$Q = \alpha (T - T_c)dt, \quad (5)$$

где α - коэффициент теплоотдачи калориметра, T_c - температура термостата. Величина поправки Θ связана с q уравнением

$$\Theta = q/(mc + \varepsilon). \quad (6)$$

Подставляя q , выраженное из (6), в формулу (5), получим

$$\Theta = k (T - T_c)dt, \quad (7)$$

где $k = \alpha/(mc + \varepsilon)$. Пусть за малое время dt температурная поправка составляет $d\Theta$,

т.е. $dq = (mc + \varepsilon)d\Theta = \alpha(T - T_c)dt$. Будем считать α и T_c постоянными величинами. Выражение

$$(d\Theta/dt)_T = k(T - T_c) \quad (8)$$

характеризует скорость охлаждения системы вблизи температуры T .

Тогда $(d\Theta/dt)_T = k(T_1 - T_c)$ и $(d\Theta/dt)_T = k(T_2 - T_c)$ - скорости охлаждения вблизи температур T_1 и T_2 . Равенство $d\Theta/dt = dT/dt$ справедливо в том случае, когда нагреватель выключен и тепло в систему не поступает, т.е. в начальные и конечные периоды, исключая область, где сказывается тепловая инерция нагревателя. Так как $T_0 - T_1$ и $T_2 - T_3$ невелики, то изменение температуры в начальный и конечный периоды можно считать линейными. Заменяем $(d\Theta/dt)$ величиной $(\Delta T/\Delta t)_T$ и рассчитаем эту величину из графика температурного хода охлаждения: $(T/t)_T$ из линейной части начального периода, а $(\Delta T/\Delta t)_T$ из линейной части конечного периода.

Будем считать, что скорость нагревателя калориметра в течение главного периода значительно больше скорости охлаждения, играющего роль небольшой поправки к основному процессу нагревания. Тогда временную зависимость температуры в течение главного периода можно приблизительно считать линейной:

$$T = \dots\dots\dots t + \dots\dots\dots \quad (9)$$

$$T_2 - T_1 \qquad t_2 - t_1$$

$$T_1 - T_1 \qquad t_1 - t_1$$

Подставим выражение (9) в соотношение (7). Проинтегрируем уравнение (7) и, используя значения $(\Delta T/\Delta t)_T$ и $(\Delta T/t)_T$, получим окончательно

$$\Theta = \frac{1}{2} [(\Delta T/\Delta t)_T t_1 + (\Delta T/\Delta t)_T t_2] (t_2 - t_1) \quad (10).$$

2.3 Измерение C_D

Для измерения теплоёмкости при постоянном давлении

исследуемый газ заставляют протекать через калориметр. В качестве примера такого метода приведём описание классического опыта Реньо (1862 г.). Схема аппарата

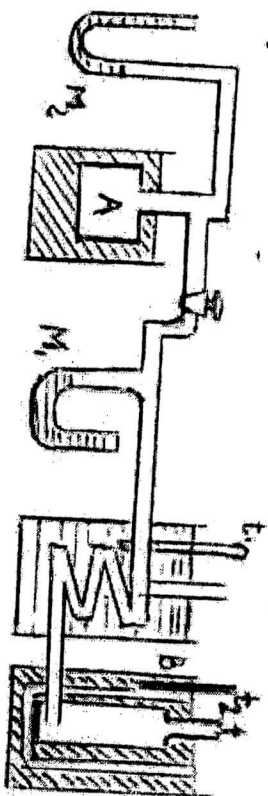


Рис. 2. Схема аппарата для измерения c_p

Исследуемый газ из резервуара А через кран Н пропускают через змеевик, помещенный в сосуд с маслом В, нагреваемый каким-нибудь источником тепла. Давление газа регулируется краном Н, а его постоянство контролируется манометром M_1 . Проходя длинный путь в змеевике, газ принимает температуру масла, которая измеряется термометром t_1 .

Нагретый в змеевике газ проходит затем через водяной калориметр, охлаждаемый в нём до некоторой температуры T_2 , измеряемой термометром t_2 , и выходит наружу. Измерив давление газа в резервуаре А в начале и в конце опыта (для этого служит манометр М), мы узнаем массу М прошедшего через аппарат газа.

Количество теплоты Q , отданное газом калориметру, равно произведению теплового эквивалента калориметра \mathcal{E} на изменение его температуры $T_2 - T_1$, где T_1 - начальная температура калориметра: $Q = \mathcal{E}(T_2 - T_1)$. С другой стороны, тепло, отданное газом, равно произведению его массы на удельную теплоёмкость и на изменение температуры газа от начального значения T до той температуры, которую он

принимает в калориметре. Но температура калориметра изменяется от T_1 до T_2 . Поэтому средняя температура газа в калориметре равна $(T_1 + T_2)/2$. Следовательно, изменение температуры газа равно $T - (T_1 + T_2)/2$, а отданное им тепло равно:

$$Q = Mc_p [T - (T_1 + T_2)/2].$$

Таким образом,

$$\mathcal{E}(T_2 - T_1) = Mc_p [T - (T_1 + T_2)/2],$$

Откуда для удельной теплоёмкости получается равенство

$$c_p = \mathcal{E}(T_2 - T_1) / [M(T - (T_1 + T_2)/2)] \quad (11),$$

а молярная теплоёмкость $C_p = \mu c_p$.

3. Описание установки.

1. Общий вид установки показан на рис.3. Где на передней панели расположены: 1 - источник питания, 2 - мультиметр, 3 - тумблер «компрессор» для включения микрокомпрессора, кран К1 (7) служит для напуска воздуха в рабочий объём от микрокомпрессора, кран «К» (8) переключает правое колено манометра (9), тумблер «сеть» (4), индикатор термометра (5), тумблер «I - U» (6) для подключения мультиметра в режиме измерения тока нагревателя либо напряжения на нагревателе, калориметрический сосуд (13) и кран «К2» (10) для соединения рабочего объёма с атмосферой. Тумблер (17) включения термометра.
2. Воздух, находящийся в калориметрическом герметизированном сосуде (13) (рис.4), нагревается электрической спиралью (11). Температура воздуха измеряется терматурным датчиком (12), концы которого соединены с индикатором (5). К переключателю (6) подсоединены провода от

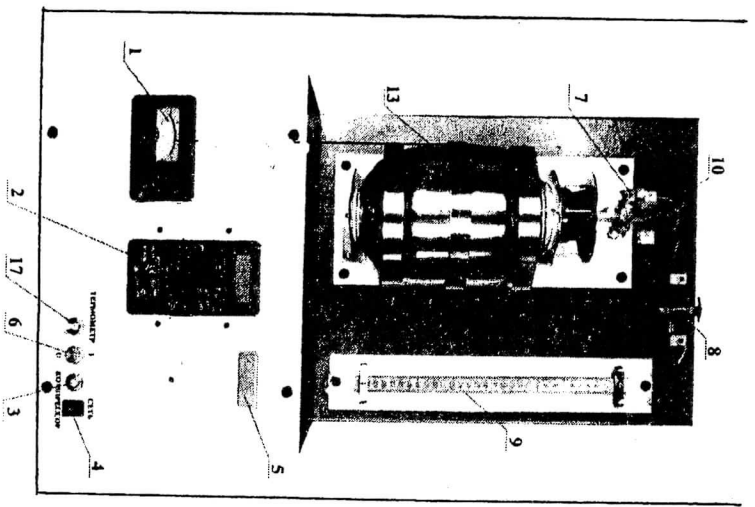


Рис. 3. Внешний вид установки УКЛО – 2В-6

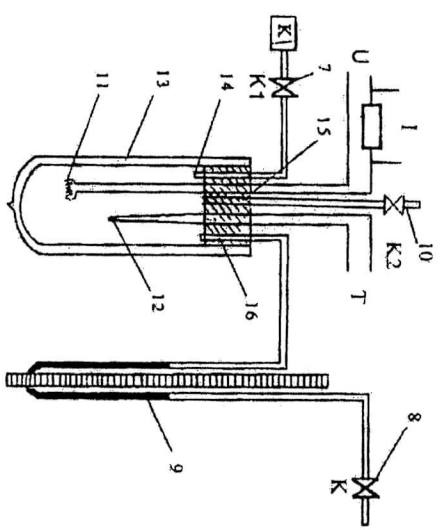


Рис. 4. Схема работы нагревателя.

4. Ход выполнения работы.

Упражнение 1, 2. Определение калориметрической постоянной и C_p .

1. Лабораторная установка поставляется в полностью подготовленном для работы виде.
2. Перекрыть вентиля (8) (сообщения правого колена U-манометра с атмосферой), (7) (сообщения рабочего объёма сосуда с микропроцессором) и (10) (сообщения рабочего объёма с атмосферой).
3. Включить питание приборного модуля тумблером «сеть», мультиметр включается одновременно, включите блок напряжения, включить термометр (17). 4. Ручкой регулятора напряжения источника питания приборного модуля

Упражнение 3. Проверка абсолютной шкалы температуры Кельвина.

Современная термометрия основана на шкале идеального газа, устанавливаемой с помощью газового термометра. В принципе газовый термометр - это закрытый сосуд, наполненный идеальным газом и снабжённый манометром для измерения давления газа. Значит термометрическим веществом в таком термометре служит идеальный газ, а термометрической величиной - давление газа при постоянном объёме. Зависимость давления от температуры принимается линейной. Такое допущение приводит к тому, что отношение давлений при температурах кипения воды (p_k) и таяния льда (p_0) равно отношению самих этих температур: $p_k/p_0 = T_k/T_0$. Отношение p_k/p_0 легко определить из опыта. Многочисленные измерения показали, что $p_k/p_0 = 1,3661 = T_k/T_0$. Размер градуса выбирается деление разности $T_k - T_0$ на сто частей: $T_k - T_0 = 100$. Из последних двух равенств следует, что температура таяния льда T_0 по выбранной нами шкале равна 273,15 К, а температура кипения воды $T_k = 373,15$ К. Для того чтобы при помощи газового термометра измерить температуру какого-нибудь тела, надо привести тело в контакт с газовым термометром и, дождавшись равновесия, измерить давление газа в термометре. Тогда температура тела определится по формуле

$$T = 273,15 \, p/p_0 = 273,15 \, h/h_0 = (T_k - T_0)h/(p_k - p_0), \quad (12) \text{ т.к.}$$

давление прямо пропорционально высоте столба в манометре. Проверка абсолютной шкалы температур Кельвина газовым термометром постоянного объёма может быть выполнена на этой же установке. На рис. 4, показана принципиальная схема опыта.

Величину давления газа в процессе $V = \text{const}$ можно выбрать в качестве «термометрического свойства».

В опыте измеряется температура T_i калориметрическом сосуде постоянного объёма $V = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ и соответствующее ей давление P_i в герметичном колене U - манометра, соединённом через водяной затвор с калориметрическим сосудом. Объём калориметрического сосуда V много больше объёма воздуха герметичного колена U - манометра (правое колено. Давление воздуха в этих объёмах можно считать одинаковым. Изохорный нагрев воздуха в калориметрическом сосуде приводит к изотермическому сжатию воздуха в герметичном колене U - манометра. Температура воздуха в калориметрическом сосуде T_i измеряется цифровым термометром. Построив график линейной зависимости $T(h)$ можно определить тангенс угла наклона и, следовательно, температуру окружающей среды.

Выполнение упражнения 3.

12. Перекрыть вентиля (8) (сообщения правого колена U -манометра с атмосферой), (7) (сообщения рабочего объёма сосуда с микрокомпрессором) и (10) (сообщения рабочего объёма сосуда с атмосферой).
13. Произвести отсчёт значения температуры.
14. Произвести отсчёт h высоты «столба» воздуха в правом колене манометра.
15. Включить электропитание приборного модуля, включить термометр. Ручкой регулятора напряжения источника питания приборного модуля установить напряжение на нагревателе калориметрического сосуда U (5... 8) В. При этом необходимо следить за тем, чтобы изменение температуры и высоты «столба» воздуха h в правом колене происходило достаточно медленно.
16. Произвести отсчёт значений температуры и разности уровней в коленах U - манометра h через (5... 10) с. Результаты 10-15 значений занести в таблицу 3.

Таблица 3

T									
h									

17. Обработка результатов измерений.

- 1) Определить по ртутному термометру температуру воздуха в лаборатории то, $T = 273,15 + t$.
- 2) Построить график зависимости $T = f(h)$.
- 3) Из графика определить тангенс угла наклона прямой.
- 4) Определить температуру окружающей среды T в температурной шкале Кельвина по формуле (12).
18. Повторить п.11.

5. Контрольные вопросы.

1. Что такое теплота? Как рассчитывается теплота в молекулярной физике?
2. Сформулируйте первое начало термодинамики для изобарического процесса и поясните величины, входящие в него.
- Что называют внутренней энергией газа и как её рассчитать?
- Что такое работа в молекулярной физике и как она рассчитывается?
5. Что называется теплоёмкостью вещества? В каких пределах она изменяется?
6. Выведите формулу для c_p для однокомпонентного газа.
7. Выведите формулу для c_p для смеси газов, состоящей из кислорода и двуокиси азота.
8. Каков физический смысл универсальной газовой постоянной?
9. Каков физический смысл температуры?
10. Что такое абсолютная температурная шкала?

11. Сформулируйте третье начало термодинамики.
12. Что такое степени свободы? Какими они бывают?
13. Как работает калориметр?
14. Что такое калориметрическая постоянная? Чему она равна в данной работе?
15. Объясните схему опыта для измерения c_p .
16. Как определяется c_p в данной работе? Чему равно c_p ?
17. Сколько степеней свободы соответствует этому значению c_p ?
18. Чему должно быть равно c_p теоретически?
19. Теплоёмкость каких газов зависит от температуры и почему?
20. Что такое газовый термометр и как его можно использовать для определения температуры?

Библиографический список.

1. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т.2 - М. «Наука», 1990-68с.
2. Савельев И.В. Курс общей физики. Т.1 - М. «Наука», 2002-234 с.
3. Киконин А.К., Киконин И.К. Молекулярная физика. - М. «Наука», 2000-103, 129 с.