

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

**МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА:
ЧАСТЬ 5. ОБЪЕМНЫЕ СВОЙСТВА ТЕЛ**

Практикум для вузов

Составители:
В.И. Кукуев,
В.В. Чернышев,
И.А. Попова.

ВОРОНЕЖ
2009

Утверждено научно-методическим советом физического факультета
17 февраля 2006 года, протокол № 2.

Практикум подготовлен на кафедре общей физики физического факультета Воронежского государственного университета.

Рекомендуется для студентов физического факультета 1 курса д/о и 2 курса в/о. Для специальностей: 010701 (010400) – Физика, 010803 (014100) – Микроэлектроника и полупроводниковые приборы, 010801 (013800) – Радиофизика и электроника.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА
МЛ-5/1

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ УДЕЛЬНЫХ ТЕПЛОЕМКОСТЕЙ
ГАЗА МЕТОДОМ КЛЕМАНА И ДЕЗОРМА**

Цель работы – определение отношения теплоемкостей при постоянном давлении к теплоемкости при постоянном объеме.

ВВЕДЕНИЕ

Клеман и Дезорм в 1819 году предложили следующий метод измерения отношения теплоемкостей газов. Стеклянный сосуд наполняется исследуемым газом (в данной работе – воздухом) до атмосферного давления P_0 . С помощью насоса в сосуд дополнительно накачивается небольшая порция воздуха, затем кран K_1 закрывается. Через некоторое время температура воздуха в сосуде сравнивается с температурой окружающего воздуха T_0 . При этом давление газа обозначим P_1 . Это первое состояние газа.

Затем на короткое время открывают кран K_2 , соединяя сосуд с атмосферой. Часть газа выйдет из сосуда и его давление сравнивается с атмосферным. Так как этот процесс происходил быстро, его можно считать адиабатическим, поэтому температура газа понизилась до некоторого значения T . Это второе состояние газа.

Выделим мысленно внутри сосуда некоторую массу газа. Обозначим объем этой порции газа в первом состоянии V_1 , во втором состоянии – V_2 . Переход этой массы из первого состояния во второе подчиняется уравнению адиабатического процесса:

$$PV^\gamma = const ,$$

где $\gamma = C_p/C_v$ – отношение теплоемкостей газа при постоянном давлении и постоянном объеме. Взяв полный дифференциал от обеих частей уравнения, получим:

$$\gamma PV^{\gamma-1}dV + V^\gamma dP = 0 . \quad (1)$$

Так как измерение давления P_0-P_1 выделенной порции газа мало по сравнению с атмосферным давлением, можно считать $P_0-P_1=dP$, аналогично $V_2-V_1=dV$. Подставляя эти значения в равенство (1) получим:

$$\gamma P(V_2 - V_1) + (P_0 - P_1) = 0 . \quad (2)$$

После того как давление газа в сосуде сравнивается с атмосферным кран, K_2 закрывают, и газ начинает медленно нагреваться, пока его температура не сравняется с температурой T_0 окружающего воздуха. Объем выделенной

порции газа при этом остается постоянным, так как не изменяется объем всего газа в закрытом сосуде.

Давление газа в сосуде становится равным P_2 . Состояние с параметрами P_2, V_2, T_0 – третье состояние выделенной порции газа. В первом и третьем состояниях температуры газа одинаковы, поэтому произведение PV в этих соотношениях одинаково:

$$PV = const . \quad (3)$$

Возьмем полный дифференциал от обеих частей (3):

$$PdV + VdP = 0 .$$

Так как $dV = V_2 - V_1$, $dP = P_2 - P_1$, то имеем:

$$P(V_2 - V_1) + V(P_2 - P_1) = 0 . \quad (4)$$

Разделив равенство (2) на равенство (4), получаем:

$$\gamma = \frac{P_1 - P_0}{P_1 - P_2} . \quad (5)$$

Обозначив $H_1 = P_1 - P_0$, $H_2 = P_2 - P_0$, перепишем (5) в виде:

$$\gamma = \frac{H_1}{H_1 - H_2} . \quad (6)$$

Здесь H_1 и H_2 – разности высот уровней в коленах манометра в первом и третьем состояниях соответственно.

Примечание: При выводе предполагалось, что первоначально воздух в сосуд нагнетается. Но вывод не изменится, если воздух из сосуда откачать.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Приборы и принадлежности: стеклянный сосуд с трехходовым краном, водяной манометр, воздушный насос.

Установка представляет собой стеклянный сосуд (рис.1) с трехходовым краном. С помощью трехходового крана сосуд может соединяться с воздушным насосом и атмосферой или перекрываться.

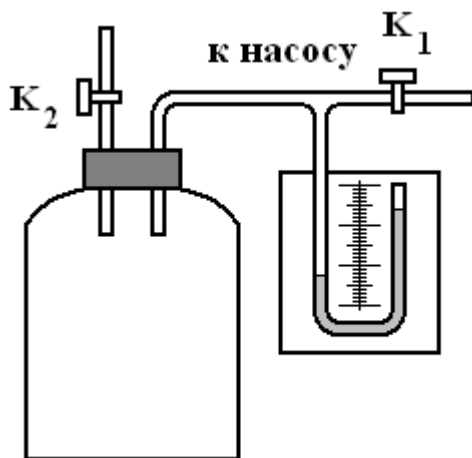


Рис. 1. Установка для определения отношения удельных теплоемкостей газа.

ПОРЯДОК ИЗМЕРЕНИЙ

1. Повернуть кран в положение, при котором сосуд соединяется с насосом. Накачать воздух в сосуд до давления, соответствующего разности уровней в манометре, равной 15-20 см. Отключить сосуд от насоса и атмосферы.
2. Выждать (около 5 минут) до установления теплового равновесия и, когда давление окончательно установится, произвести расчет разности уровней H_1 .
3. Соединить краном сосуд с атмосферой. Как только уровни в обоих коленах манометра сравняются, быстро перекрыть кран.
4. Выждать не менее 5 минут, при этом давление в сосуде начнет увеличиваться вследствие нагревания воздуха.
5. При установившемся давлении в сосуде произвести второй отсчет H_2 разностей уровней в коленах манометра.
6. Вычислить величину γ по формуле (6).
7. Опыт повторить 10 раз, записывая результаты в таблицу.
8. Найти среднее значение γ .
9. Вычислить погрешность измерений, принимая во внимание тот факт, что в проделанных опытах условия эксперимента не воспроизводятся (каждый раз накачиваются различные порции воздуха).
10. Представить окончательный результат с учетом абсолютной и относительной погрешностей. Сформулировать выводы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сивухин Д.В. Общий курс физики М., 1979. Т.2 с.67-79.
2. Кикоин А.К., Кикоин И.К. Молекулярная физика. М., 1976 с.103-123.
3. Телеснин Р.В. Молекулярная физика. М., 1973 с.72-83.
4. Матвеев А.Н. Молекулярная физика М., 1981 с.132-136,142-144.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Первое начало термодинамики.
2. Теплоемкость газа. Удельная и молярная теплоемкости.
3. Теплоемкости при постоянном давлении и при постоянном объеме. Связь их с числом степеней свободы молекул газа.
4. Вывести уравнение Майера.
5. Адиабатный процесс. Уравнение этого процесса в переменных P - V (уравнение Пуассона), P - T , V - T . График адиабаты.
6. Метод Клемана и Дезорма для определения отношения C_p/C_v .

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ ТЕПЛОЕМКОСТЕЙ ВОЗДУХА ПРИ ПОСТОЯННОМ ДАВЛЕНИИ И ПОСТОЯННОМ ОБЪЕМЕ

Цель работы – изучение процессов в идеальных газах, определение отношения теплоемкостей $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$ для воздуха.

ТЕОРИЯ МЕТОДА

Удельной теплоемкостью вещества называется величина, равная количеству теплоты, которую необходимо сообщить единице массы вещества для увеличения ее температуры на один Кельвин

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

Теплоемкость одного моля вещества называется молярной теплоемкостью

$$C = \frac{1}{m/\mu} \frac{\delta Q}{dT} , \quad (2)$$

где m – масса; μ – молярная масса вещества. В термодинамике обычно более удобно использовать молярную теплоемкость.

Значение теплоемкости газа зависит от вида процесса, происходящего в газе. Согласно первому началу термодинамики количество теплоты δQ , сообщенной системе, расходуется на изменение внутренней энергии dU и на совершение системой работы δA против внешних сил

$$\delta Q = dU + \delta A . \quad (3)$$

Изменение внутренней энергии идеального газа в случае изменения его температуры на dT равно

$$dU = \frac{m}{\mu} \frac{i}{2} R dT , \quad (4)$$

где i – число степеней свободы молекулы, под которым подразумевается число независимых координат, определяющих положение и конфигурацию молекулы в пространстве: $i = 3$ для одноатомной, $i = 5$ для двухатомной жесткой молекулы, $i = 6$ для трех- и многоатомных жестких молекул; R – универсальная газовая постоянная ($R = 8,31$ Дж/моль·К).

При расширении газа производится элементарная работа

$$\delta A = PdV . \quad (5)$$

Если газ нагревать при постоянном объеме $V = const$, то $\delta A = 0$ и, согласно (3), все полученное газом количество теплоты расходуется только на увеличение его внутренней энергии $\delta Q_V = dU$.

Учитывая (4), молярная теплоемкость газа при постоянном объеме равна

$$C_v = \frac{dU}{dT} = \frac{i}{2} R . \quad (6)$$

Если газ нагревать при постоянном давлении $P = const$, то полученное газом малое количество теплоты δQ_P расходуется на изменение внутренней энергии dU и совершение элементарной работы $\delta A = PdV$, $\delta Q_P = dU + PdV$. Тогда молярная теплоемкость идеального газа при постоянном давлении равна

$$C_P = \frac{dU}{dT} + P \left(\frac{dV}{dT} \right)_P. \quad (7)$$

Используя уравнение состояния идеального газа (уравнение Менделеева-Клапейрона) $PV = \frac{m}{\mu} RT$, можно доказать, что для одного моля газа $P \left(\frac{dV}{dT} \right)_P = R$ и поэтому

$$C_P = C_V + R. \quad (8)$$

Соотношение (8) называется формулой Майера. Тогда

$$C_P = \frac{i+2}{2} R \quad \text{и} \quad \gamma = \frac{C_P}{C_V} = \frac{i+2}{i}. \quad (9)$$

Адиабатным называют процесс, протекающий без теплообмена с окружающей средой: $\delta Q = 0$. На практике он может быть осуществлен в системе, окруженной теплозащитной оболочкой, но так как для теплообмена необходимо некоторое время, то адиабатным можно считать также процесс, который протекает так быстро, что система не успевает вступить в теплообмен с окружающей средой.

Первый закон термодинамики с учетом (4) – (6) для адиабатного процесса имеет вид:

$$\frac{m}{\mu} C_V dT = -PdV. \quad (10)$$

Взяв полный дифференциал от левой и правой частей уравнения Менделеева-Клапейрона $PdV + VdP = \frac{m}{\mu} R dT$ и подставляя dT в формулу (10), получим $(C_V + R)PdV + C_V VdP = 0$.

Учитывая соотношение между молярными теплоемкостями идеального газа при постоянном давлении и объеме, которое описывается формулой Майера (8), а также (9), получим:

$$\gamma \frac{dV}{V} + \frac{dP}{P} = 0.$$

Решение написанного дифференциального уравнения имеет вид:

$$PV^\gamma = const. \quad (11)$$

Уравнение (11) называется уравнением адиабаты (уравнением Пуассона), а введенная в (9) величина γ – показателем адиабаты.

Метод определения показателя адиабаты, предложенный Клеманом и Дезормом (1819 г.), основывается на изучении параметров некоторой массы газа, переходящей из одного состояния в другое двумя последовательными процессами – адиабатным и изохорным. Эти процессы на диаграмме $P - V$ (рис. 1) изображены кривыми 1-2 и 2-3 соответственно. Если в баллон, соединенный с открытым водяным манометром, накачать воздух и подождать до установления теплового равновесия с окружающей средой, то в

этом начальном состоянии 1 температура газа в баллоне равна температуре окружающей среды $T_1 = T_0$, а давление $P_1 = P_0 + P'$ немного больше атмосферного.

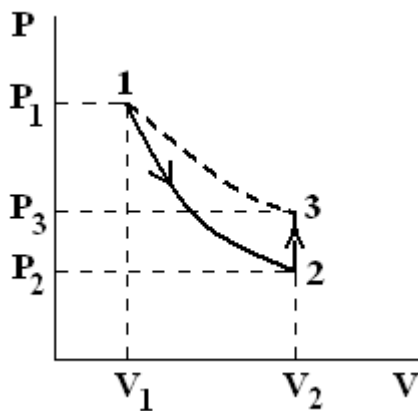


Рис. 1. Процессы изменения состояния газа в течение опыта.

Если теперь на короткое время соединить баллон с атмосферой, то произойдет адиабатное расширение воздуха. При этом воздух в баллоне перейдет в состояние 2, его давление понизится до атмосферного $P_2 = P_0$. Масса воздуха, оставшегося в баллоне, которая в состоянии 1 занимала часть V_1 объема баллона, расширяясь, займет весь объем V_2 . При этом температура воздуха, оставшегося в баллоне, понизится до T_2 . Поскольку процесс 1-2 – адиабатный, к нему можно применить уравнение Пуассона (11)

$$P_1 V_1^\gamma = P_2 V_2^\gamma \quad \text{или} \quad \frac{T_1^\gamma}{P_1^{\gamma-1}} = \frac{T_2^\gamma}{P_2^{\gamma-1}} .$$

Отсюда

$$\left(\frac{P_0 + P'}{P_0} \right)^{\gamma-1} = \left(\frac{T_0}{T_2} \right)^\gamma . \quad (12)$$

После кратковременного соединения баллона с атмосферой охлажденный из-за адиабатного расширения воздух в баллоне будет нагреваться (процесс 2-3) до температуры окружающей среды $T_3 = T_0$ при постоянном объеме $V_3 = V_2$. При этом давление в баллоне поднимается до $P_3 = P_2 + P''$. Поскольку процесс 2-3 – изохорный, к нему можно применить закон Шарля $\frac{P_2}{T_2} = \frac{P_3}{T_3}$, отсюда

$$\frac{P_0 + P''}{P_0} = \frac{T_0}{T_2} . \quad (13)$$

Из уравнений (12) и (13) получим

$$\left(\frac{P_0 + P'}{P_0} \right)^{\gamma-1} = \left(\frac{P_0 + P''}{P_0} \right)^\gamma .$$

Прологарифмируем:

$$(\gamma - 1) \ln \left(1 + \frac{P'}{P_0} \right) = \lambda \ln \left(1 + \frac{P''}{P_0} \right).$$

Поскольку избыточные давления P' и P'' очень малы по сравнению с атмосферным давлением P_0 и, учитывая, что при $x \ll 1$ $\ln(1+x) \approx x$, будем иметь $(\gamma - 1) P' = \gamma P''$. Откуда

$$\gamma = \frac{P'}{P' - P''}. \quad (14)$$

Избыточные давления P' и P'' измеряются с помощью U-образного манометра по разности уровней жидкости с плотностью ρ

$$P' = \rho g H; \quad P'' = \rho g h. \quad (15)$$

Из (14) и (15) получим расчетную формулу для определения γ

$$\gamma = \frac{H}{H - h}. \quad (16)$$

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Для определения отношения теплоемкостей воздуха $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$ предназначена экспериментальная установка ФТП1-6, общий вид которой представлен на рис. 2.

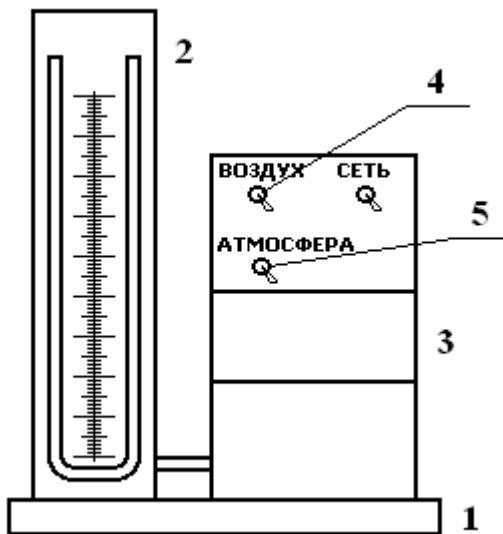


Рис. 2. Общий вид экспериментальной установки ФТП1-6.

- 1 – стойка;
- 2 – манометр;
- 3 – блок приборов;
- 4 – тумблер «Воздух»;
- 5 – тумблер «Атмосфера».

Установка состоит из стеклянной колбы, находящейся внутри блока приборов 3 и соединенной с открытым водяным манометром 2. Воздух нагнетается в колбу микрокомпрессором, размещенным в блоке приборов 3. Микрокомпрессор включается тумблером «Воздух» 4, установленным на передней панели блока приборов. Пневмотумблер «Атмосфера» 5, расположенный на панели блока приборов, в положении «Открыто» позволяет соединить колбу с атмосферой.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Включить установку тумблером «Сеть».
2. Установить пневмотумблер «Атмосфера» в положение «Закрыто». Для подачи воздуха в колбу включить тумблер «Воздух».
3. С помощью манометра контролируют давление в колбе. Когда разность уровней воды в манометре достигнет 150...250 мм вод.ст., отключить подачу воздуха.
4. Подождать 2...3 минуты, пока температура воздуха в колбе сравняется с температурой окружающего воздуха T_0 ; в колбе при этом установится постоянное давление $P_1 = P_0 + \rho gH$. Определить разность уровней H , установившуюся в коленах манометра, и полученное значение занести в таблицу.

Таблица

№ измерения	H , мм вод.ст.	h , мм вод.ст.	γ

5. На короткое время соединить колбу с атмосферой, установив пневмотумблер «Атмосфера» в положение «Открыто». Как только разность высот в коленах станет равной нулю, быстро прекратить связь колбы с атмосферой.
6. Через 2...3 минуты, когда в колбе установится постоянное давление $P_3 = P_0 + \rho gh$, определить h , установившуюся в коленах манометра, и полученное значение занести в таблицу.
7. Повторить измерения по п.п. 2-6 не менее 10 раз при различных значениях величины H .
8. Выключить установку тумблером «Сеть».
9. Для каждого измерения определить по формуле (16) отношение теплоемкостей γ . Данные занести в таблицу. Найти среднее значение $\langle \gamma \rangle$.
10. Оценить погрешность измерения результатов.

Внимание!

1. Студент включает установку и начинает выполнять работу только под контролем преподавателя или лаборанта.
2. При выполнении п.п. 2-3 разность высот жидкости в коленах манометра не должна превышать 25 см. По достижении такой разности необходимо *быстро* отключить подачу воздуха во избежание выброса жидкости из манометра.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сивухин Д.В. Общий курс физики / Д.В. Сивухин. – М.: Изд-во МФТИ, 2003. – Т.2: Термодинамика и молекулярная физика. – 576 с.
2. Кикоин А.К. Молекулярная физика / А.К. Кикоин, И.К. Кикоин. – М.: Наука, 1976. – 480 с.

3. Телесин Р.В. Молекулярная физика / Р.В. Телесин. – М.: Высш.шк., 1973. – 360 с.
4. Матвеев А.Н. Молекулярная физика / А.Н. Матвеев. – М.: Высш.шк., 1981. – 400 с.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое изопроцессы и каким законам они подчиняются? Нарисуйте графики этих процессов.
2. Сформулируйте первый закон термодинамики. Запишите этот закон для изохорного, изобарного, изотермического и адиабатного процессов.
3. Дайте определение удельной и молярной теплоемкости. В каких единицах СИ они измеряются?
4. Как связаны между собой молярные теплоемкости C_p и C_v идеального газа? Выведите формулу Майера.
5. Дайте определение числа степеней свободы молекулы. Чему равна величина i для 1-, 2-, 3- и многоатомного идеальных газов? Как связаны молярные теплоемкости C_p и C_v с числом степеней свободы молекул идеального газа?
6. Рассчитайте теоретическое значение γ для 1-, 2- и 3- атомного идеального газа, считая молекулы жесткими.
7. Какой процесс называется адиабатным? Выведите уравнение этого процесса в переменных $P-V$, $T-V$, $P-T$.
8. В чем заключается метод Клемана и Дезорма для определения отношения $\frac{C_p}{C_v}$?
9. Опишите рабочий цикл экспериментальной установки по $P-V$ диаграмме.
10. Выведите расчетную формулу для определения γ .
11. Почему и как изменяется температура газа в колбе при проведении опыта?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

МЛ-5/3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ЛИНЕЙНОГО РАСШИРЕНИЯ МЕТАЛЛОВ

Цель работы – изучение теплового расширения металлических стержней.

ВВЕДЕНИЕ

Твердые тела при нагревании увеличивают свой объем. Это – тепловое расширение, то есть при повышении температуры увеличиваются средние

расстояния между атомами кристалла твердого тела. В чем причина этого увеличения? При повышении температуры кристалла увеличивается энергия тепловых колебаний атомов в решетке, следовательно, и амплитуда этих колебаний. Вследствие того, что колебания атомов в кристаллической решетке являются ангармоническими, при возрастании амплитуды колебаний рост сил отталкивания между атомами преобладает над ростом сил притяжения. Это приводит к увеличению среднего расстояния между атомами и, следовательно, к увеличению объема тела при его нагревании. Таким образом, причиной теплового расширения твердых тел является ангармоничность колебаний атомов в кристаллической решетке.

Количественно тепловое расширение характеризуется коэффициентами линейного и объемного расширения, которые определяются следующим образом. Пусть тело длиной L при изменении температуры на dT градусов изменяет свою длину на dL , тогда коэффициент линейного расширения α определяется по формуле:

$$\alpha = \frac{1}{L} \frac{dL}{dT}, \quad (1)$$

то есть коэффициент α равен относительному изменению длины при изменении температуры на один градус.

Соответственно, коэффициент объемного расширения β определяется так:

$$\beta = \frac{1}{V} \frac{dV}{dT}, \quad (2)$$

значит, коэффициент β равен относительному изменению объема при изменении температуры на один градус.

Коэффициенты теплового расширения, вообще говоря, зависят от температуры: при низких температурах α и β уменьшаются с понижением температуры, стремясь к нулю при абсолютном нуле. При достаточно высоких температурах, однако, α и β практически можно считать постоянными, если рассматриваемый интервал температур не слишком велик. Тогда формулы (1) и (2) можно переписать, заменяя производные отношениями конечных приращений ΔL и ΔV длины и объема к изменению ΔT температуры тела:

$$\alpha = \frac{1}{L} \frac{\Delta L}{\Delta T}, \quad \beta = \frac{1}{V} \frac{\Delta V}{\Delta T}. \quad (3)$$

В данной работе определяются коэффициенты линейного расширения металлических стержней в интервале температур $0 \div 100$ °С. В этом случае $L = L_0$ – длина стержня при 0 °С.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Приборы и принадлежности: горизонтальный оптиметр, набор металлических стержней, штангенциркуль, электрическая плитка, парообразователь, резиновые трубки.

Горизонтальный оптиметр позволяет определять удлинение образца с точностью 0,001 мм. Он показан на рис.1.

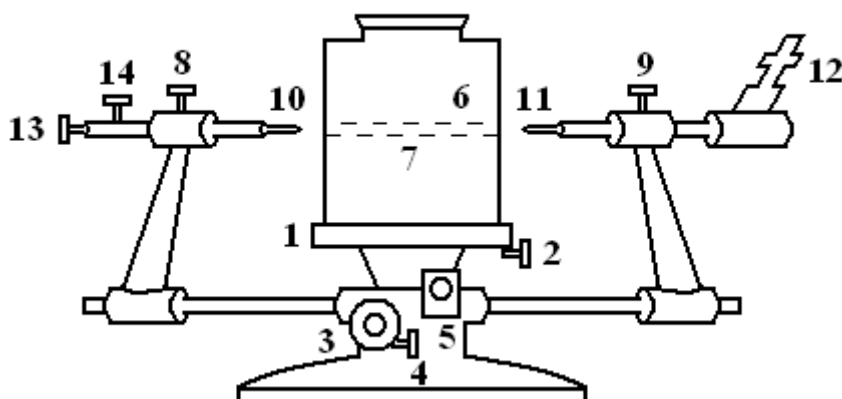


Рис. 1.
Горизонтальный оптиметр.

На станине оптиметра установлен подвижный столик 1. Винт 2 осуществляет горизонтальное перемещение столика. Винт 3 перемещает столик в вертикальном направлении, если освободить винт 4. Винт 5 позволяет установить плоскость столика горизонтально.

Внимание: винт 5 студентам трогать не разрешается!

На столике закреплен металлический сосуд 6 с горизонтальным цилиндрическим отверстием 7 для образца. Освободив винты 8 и 9, можно подвести к торцевым поверхностям образца агатовые наконечники 10 и 11. Отсчетная шкала прибора помещается в насадке 12, оптическая схема которой рассмотрена ниже.

В окуляре насадки наблюдаются отсчетная шкала и указатель. Винт 13 служит для установки нулевого (или любого другого) деления шкалы против указателя.

Внимание: винт 13 можно вращать только после освобождения винта 14!

Вращение винта 13 производится только с разрешения преподавателя или лаборанта. После окончательной установки шкалы винты 8, 9 и 14 должны быть закреплены.

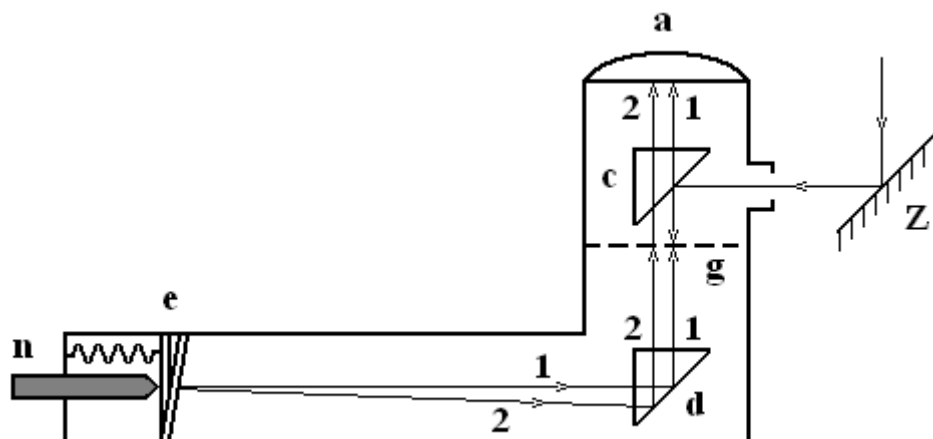


Рис. 2.
Оптическая схема насадки.

Рассмотрим оптическую схему насадки (рис.2). Свет от зеркала **Z** попадает на полупрозрачную призму **c**, затем на поворотную призму **d**. Агатовый наконечник **n** упирается в зеркало **e**. Один конец зеркала закреплен с помощью пружины, другой – на шарнире. Поэтому в зависимости от положения агатового наконечника зеркало может поворачиваться. При этом смещается отраженный от него луч, и в окуляр **a** видны различные деления шкалы **g**.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ЛИНЕЙНОГО РАСШИРЕНИЯ

1. Измерить штангенциркулем длину стержня L_1 три раза, найти среднее значение.
2. Вставить образец в отверстие 7 сосуда 6, освободить винты 8 и 9, подвести агатовые наконечники 10 и 11 до соприкосновения со стержнем (туго не зажимать!).
3. Закрепить винты 8 и 9, освободить винт 14 и с помощью винта 13, наблюдая в окуляр, установить нулевое деление шкалы против указателя. Винт 14 закрепить.
4. Налить в сосуд 6 воду со льдом (снегом), закрепить его и, наблюдая в окуляр, убедиться, что температура стержня стала равной $T_1 = 0\text{ }^\circ\text{C}$.

Примечание: При отсутствии льда стержень охлаждают водой из водопровода, тогда начальная температура T_1 равна температуре этой воды.

5. Освободить винт 14 и винтом 13 установить правое крайнее деление против указателя шкалы (при нагревании шкала будет смещаться вправо). Закрепить винт 14.
6. Осторожно, с помощью резиновых трубок соединить сосуд 6 с парообразователем и со сливом. Включить плитку с парообразователем.
7. Наблюдать в окуляр оптиметра за изменением длины образца. После установления теплового равновесия при $T_2 = 100\text{ }^\circ\text{C}$ измерить величину удлинения ΔL образца по шкале оптиметра.
8. Отключить установку от парообразователя (осторожно!), охладить проточной водой.
9. Вычислить коэффициент линейного расширения образца по формуле:

$$\alpha = \frac{\Delta L}{L_0 \Delta T} \approx \frac{\Delta L}{L_1 \Delta T} .$$

Здесь $\Delta T = T_2 - T_1$, $L_0 \approx L_1$, так как погрешность измерения первоначальной длины L_1 штангенциркулем сравнима с измерением этой длины стержня при охлаждении его до $0\text{ }^\circ\text{C}$.

10. Повторить опыт с образцом из другого металла.
11. Представить результаты с указанием погрешностей, сформулировать выводы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кикоин А.К., Кикоин И.К. Молекулярная физика. -М., 1976. - С.459-465, 467-469.
2. Телеснин Р.В. Молекулярная физика. –М., 1973. – С.277-280.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Причина теплового расширения твердых тел с точки зрения их молекулярного строения.
2. Коэффициент линейного расширения, его физический смысл, размерность, зависимость от температуры.
3. Связь коэффициентов линейного и объемного расширения для изотропных кристаллов.
4. Какую из величин – ΔL или L_1 – следует измерять точнее, почему и примерно во сколько раз?
5. Почему в качестве L_0 может быть взята длина L_1 стержня, измеренная при комнатной температуре?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА МЛ-5/4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ОБЪЕМНОГО РАСШИРЕНИЯ ЖИДКОСТИ МЕТОДОМ ДЮЛОНГА И ПТИ

Цель работы – ознакомление с методом и измерение коэффициента объемного расширения жидкости.

ВВЕДЕНИЕ

При нагревании объем жидкости увеличивается. Количественно тепловое расширение жидкости характеризуется коэффициентом объемного расширения β , который определяется следующим образом. Пусть объем V при изменении температуры на ΔT градусов изменяется на ΔV , тогда коэффициент объемного расширения

$$\beta = \frac{1}{V} \frac{\Delta V}{\Delta T}, \quad (1)$$

то есть коэффициент β равен относительному изменению объема $\frac{\Delta V}{V}$, при изменении температуры на один градус.

Из этого определения β , в частности, следует, что если при 0°C объем был равен V_0 , а при температуре $T^\circ\text{C}$ стал равен V , то

$$V = V_0 (1 + \beta T). \quad (2)$$

Экспериментальное определение β непосредственно по формуле (2) оказывается затруднительным, так как при нагревании расширяется не только сама жидкость, но и сосуд, в котором она находится. Поэтому приходится вводить поправку к результату измерений, что усложняет эксперимент.

Чтобы обойти это затруднение воспользуемся методом, предложенным Дюлонгом и Пти. Метод Дюлонга и Пти основан на законе равновесия жидкостей в сообщающихся сосудах: высоты столбов жидкостей обратно пропорциональны их плотностям:

$$\frac{H_2}{H_1} = \frac{\rho_1}{\rho_2}. \quad (3)$$

При нагревании объем данного количества жидкости увеличивается, поэтому, плотность становится меньше. Если мы нагреем один из сообщающихся сосудов до температуры T_2 , оставляя другой при температуре T_1 ($T_1 < T_2$), то плотность жидкости в нагреваемом сосуде уменьшится. Если масса жидкости в каждом сосуде равна m , то плотности ρ_1 и ρ_2 соответственно равны:

$$\rho_1 = \frac{m}{V_0(1 + \beta T_1)} \quad \rho_2 = \frac{m}{V_0(1 + \beta T_2)}.$$

Деля первое равенство на второе, получим

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{1 + \beta T_2}{1 + \beta T_1}.$$

Подставляя это выражение в формулу (3), находим

$$\frac{H_2}{H_1} = \frac{1 + \beta T_2}{1 + \beta T_1}.$$

Учитывая, что коэффициент β мал, можно написать

$$(1 + \beta T_1)^{-1} \approx 1 - \beta T_1.$$

Тогда, пренебрегая членом, содержащим β^2 , получим

$$\frac{H_2}{H_1} = 1 + \beta(T_2 - T_1).$$

Отсюда для коэффициента объемного расширения окончательно имеем формулу:

$$\beta = \frac{H_2 - H_1}{H_1(T_2 - T_1)}. \quad (4)$$

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Приборы и принадлежности: установка, закрытый сосуд для получения пара (парообразователь), два термометра со шкалой до 100 °С, электроплитка, линейка, резиновые трубки.

Установка для определения коэффициента объемного расширения представлена на рис.1.

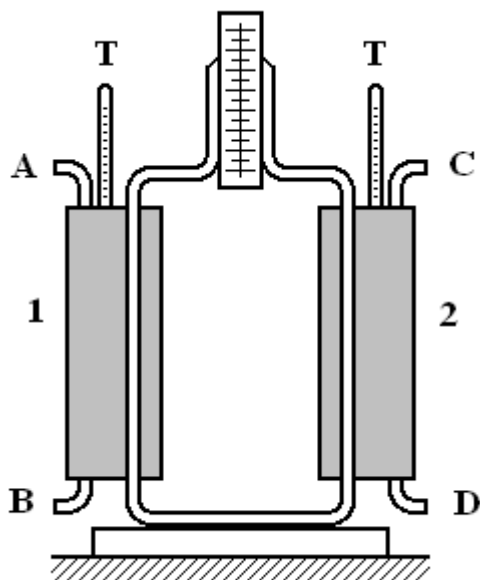


Рис. 1. Установка для определения коэффициента объемного расширения жидкостей.

Сообщающиеся сосуды, наполненные исследуемым веществом, окружены металлическими цилиндрами 1 и 2. Вверху и внизу каждого цилиндра имеется по два отвода (А и В – на левом цилиндре, С и D – на правом). Для измерения температуры исследуемой жидкости в цилиндры вставлены термометры Т.

ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ОБЪЕМНОГО РАСШИРЕНИЯ ИССЛЕДУЕМОЙ ЖИДКОСТИ (КЕРОСИНА)

1. Пропустить через правый цилиндр установки пар, через левый цилиндр – холодную воду. Для этого соединить отвод С с парообразователем. Отводы А и D соединить резиновыми трубками со сливом. Отвод В соединить с водопроводным краном. Следить за работой установки.
2. После установления теплового равновесия измерить температуры T_1 и T_2 и высоты H_1 и H_2 жидкостей в сообщающихся сосудах. Результаты записать в таблицу.
3. По формуле (4) вычислить коэффициент объемного расширения β_1 исследуемой жидкости.
4. Повторить опыт в той же последовательности выполнения пунктов задания, только пар пропускать через левый цилиндр установки. По измеренным данным величинам вычислить коэффициент объемного расширения жидкости β_2 .

5. Вывести формулу погрешности коэффициента объемного расширения и вычислить погрешности $\Delta\beta_1$ и $\Delta\beta_2$ для первого и второго опытов. Так как измерения производились однократно, погрешности прямых измерений следует принять равными инструментальным погрешностям соответствующих приборов.
6. Найти среднее арифметическое из двух полученных значений β и рассчитать его погрешность. Записать окончательный результат.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кикоин А.К., Кикоин И.К. Молекулярная физика. – М., 1976. – С. 310-316.
2. Телескин Р.В. Молекулярная физика. – М., 1973. – С. 229-230.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Коэффициент объемного расширения, его физический смысл, размерность, зависимость от параметров состояния жидкости.
2. Вывести закон сообщающихся сосудов для жидкостей с разными плотностями.
3. Метод Дюлонга и Пти для определения коэффициента объемного расширения. Вывод рабочей формулы, особенности метода.