

Московский Государственный Технический университет им. Н.Э.Баумана

Голубев В.Г., Кириллов А.М., Лунева Л.А.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВОЗДУХА

Методические указания к лабораторной работе Т-6 по курсу общей физики.

Москва, 1992.

Описывается явление теплопроводности в газах, выводятся формулы для теплоемкостей и коэффициента теплопроводности, дана экспериментальная методика определения коэффициента теплопроводности и теплоемкости воздуха.

Предназначены для студентов 1-го курса.

Цель работы - ознакомление с теорией теплоемкостей, явлениями переноса в газах и методами определения теплоемкости и коэффициента теплопроводности воздуха.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

В соответствии с первым началом термодинамики

$$dQ = dU + dA, \quad (1)$$

подведенное к газу тепло dQ расходуется на совершение работы над окружающими телами dA и на увеличение его внутренней энергии dU . Поэтому количество тепла, получаемое (отдаваемое) газом, будет зависеть от характера процесса, протекающего во время теплообмена. Теплоемкостью C газа называется физическая величина, численно равная отношению количества тепла dQ , получаемого газом при бесконечно малом изменении его состояния, к происшедшему вследствие этого изменению температуры газа dT в данном термодинамическом процессе

$$C = dQ/dT \quad (2)$$

Эта величина измеряется в джоулях на кельвин (Дж/К). Теплоемкость газа зависит от количества вещества, участвующего в теплообмене, химического состава и термодинамического состояния газа, а также процесса, в котором сообщается теплота dQ . Теплоемкость c единицы массы вещества называется удельной теплоемкостью: $c = C/m$, где m - масса газа. Измеряется удельная теплоемкость в системе СИ в Дж/(кг·К). Теплоемкость C_μ одного моля вещества называется молярной (мольной) теплоемкостью: $C_\mu = \mu \cdot c$, где μ - молярная масса вещества. Молярная теплоемкость имеет размерность в системе СИ Дж/(моль·К). Моль - это единица измерения количества вещества в системе СИ, равная количеству вещества, содержащего столько же молекул, сколько их содержит масса углерода-12, равная 0,012 кг. Для одного моля газа можно записать $C_\mu = dQ/dT$. Между молярной и удельной теплоемкостями одного и того же вещества существует соотношение $c = C_\mu/\mu$. (далее молярные теплоемкости будем обозначать прописной буквой C , а индекс μ для простоты опустим).

Рассмотрим простейший процесс нагревания газа при постоянном объеме. Элементарная работа газа над окружающими телами в общем случае определяется как

$$dA = p \cdot dV \quad (3)$$

Газ, имеющий постоянный объем, работы не совершает ($dV=0$). Подведенное к газу в этом случае количество тепла полностью расходуется на изменение его внутренней энергии: $dQ = dU$. Внутреннюю энергию U одного моля газа можно представить в виде суммы двух слагаемых U_1 и U_2 , где в U_1 входят кинетическая энергия поступательного, кинетическая энергия вращательного, а также кинетическая и потенциальная энергии колебательного движений всех его молекул, а в U_2 - потенциальная энергия межмолекулярного взаимодействия. Энергия U_1 одного моля газа равна

$$U_1 = \langle \epsilon \rangle \cdot N_A, \quad (4)$$

где $\langle \epsilon \rangle$ - средняя энергия теплового движения молекулы газа; N_A - число Авогадро. Составим общую формулу для вычисления $\langle \epsilon \rangle$. Число степеней свободы поступательного движения свободной молекулы газа равно 3. Числа степеней свобода вращательного и колебательного

движений для разных видов молекул (разных температур) могут быть разными. Пусть числа степеней свободы вращательного и колебательного движений равны соответственно r и s . Тогда для средней энергии теплового движения такой молекулы в соответствии с законом о равномерном распределении энергии по степеням свободы и с учетом того, что на одну степень свобода колебательного движения молекулы в среднем приходится вдвое больше энергии, чем на одну степень свобода поступательного или вращательного движений, получим

$$\langle \epsilon \rangle = (3+r+2s) \cdot (kT/2) = ikT/2, \quad (5)$$

где k - постоянная Больцмана, а $i = 3+r+2s$. Тогда для энергии U одного моля газа с учетом (4) запишем

$$U_1 = ikT \cdot N_A = iRT/2, \quad (6)$$

где $R = kN_A$ - универсальная газовая постоянная.

Для идеального газа энергия U_2 равна нулю, так как в идеальном газе немолекулярные силы отсутствуют. Тогда внутренняя энергия одного моля идеального газа

$$U = U_1 = iRT/2, \quad (7)$$

откуда следует, что внутренняя энергия идеального газа есть функция абсолютной температуры и химического состава и не зависит от давления и объема.

Тогда для молярной теплоемкости газа при постоянном объеме можно записать

$$C_v = (dQ/dT)_v = (dU/dT)_v, \quad (8)$$

а для идеального газа с учетом (7) $C_v = iR/2$.

Если процесс нагревания газа протекает при постоянном давлении, подведенное к газу тепло dQ расходуется не только на изменение его внутренней энергии dU , но и на совершение работы над окружающими телами dA . Для определения dA запишем уравнение Менделеева - Клапейрона применительно к одному молю газа: $pV = RT$. Продифференцировав левую и правую части этого уравнения, с учетом (3) получим

$$p \cdot (dV/dT) = R = dA/dT. \quad (9)$$

Далее, разделив все члены уравнения (1), выражающего первое начало термодинамики, на dT , для молярной теплоемкости газов при постоянном давлении находим

$$C_p = (dQ/dT)_p = (dU/dT)_p + (dA/dT)_p = (dU/dT)_p + p \cdot (dV/dT)_p \quad (10)$$

для идеального газа с учетом (7)-(9) получим

$$C_p = iR/2 + R = C_v + R. \quad (11)$$

Это соотношение, связывающее C_p и C_v , носит название закона Роберта Майера. Оно получено с использованием уравнения состояния идеального газа и, следовательно, справедливо только для идеального газа.

Одним из важнейших параметров, характеризующих термодинамические свойства газа, является показатель адиабаты γ , равный отношению теплоемкости при постоянном давлении к теплоемкости при постоянном объеме:

$$\gamma = C_p/C_v. \quad (12)$$

Для идеального газа

$$\gamma = C_p/C_v = (C_v + R)/C_v = 1 + R/C_v$$

откуда $C_v = R/(\gamma - 1)$.

Подставив это значение C_v в (7), для внутренней энергии одного моля идеального газа получим

$$U = C_v \cdot T = RT/(\gamma - 1) = (1/\gamma - 1) \cdot PV.$$

Показатель адиабаты для идеального газа $\gamma = C_p/C_v = (i+2)/i$.

Одноатомный газ. Молекулы его не вращаются ($r=0$) и не колеблются ($s=0$), $i=3$. Поэтому для одноатомного газа находим, что

$$\gamma = 3/2 = 1,67.$$

Двухатомный газ. Молекула двухатомного газа имеет три степени свобода поступательного движения, две вращательного ($r=2$), а число степеней свободы колебательного движения равно нулю, если колебаний нет, или единица, если атомы колеблются вдоль линии, соединяющей их центры. Итак, если $s=0$, то $i=3+r+2s=5$, тогда

$$\gamma=7/5=1,4.$$

Полученные результаты достаточно хорошо согласуются с измеренными при нормальных условиях значениями теплоемкостей лишь простейших газов, однако для сложных молекул типа C_6H_8 - пары бензола, C_2H_5OH - пары этилового спирта и др. расхождение между теорией и опытом велико.

Изложенная классическая теория теплоемкостей газов, в основе которой лежит закон равномерного распределения энергии по степеням свобода, приводит к выводу, что теплоемкости газа зависят от числа степеней свободы молекул и не зависят от температуры. Экспериментальные данные опровергают эти выводы классической теории теплоемкостей. Опыты показывают, что с увеличением температуры теплоемкость всех веществ, в том числе и газов, возрастает, а при понижении температуры - убывает.

Классическая теория такие плохо согласуется с экспериментальными значениями теплоемкостей многоатомных газов при средних и высоких температурах (дает заниженные значения теплоемкостей). Введение колебательных степеней свободы в рамках классического закона о равномерном распределении энергии по степеням свободы не устраняет расхождения между теорией и экспериментом.

Причина этих трудностей заключается в том, что закон о равномерном распределении энергии между всеми степенями свобода молекул не является, строго говоря, верным и лишь приближенно справедлив для простейших газов, находящихся при не слишком низких температурах.

Правильное качественное и количественное объяснение результатов опытов по измерению теплоемкостей, проведенных в широком интервале температур, было получено в квантовой теории теплоемкостей, рассмотрение которой выходит за рамки данной работы.

Беспорядочность теплового движения молекул газа, непрерывные соударения между ними приводят к постоянному перемешиванию частиц и изменению их скоростей и энергий. Если в газе существует пространственная неоднородность плотности, температуры и скорости упорядоченного перемещения отдельных слоев газа, то движение молекул выравнивает эти неоднородности. При этом в газе появляются особые процессы, объединенные общим названием явлений переноса. К этим явлениям относятся теплопроводность, внутреннее трение и диффузия.

Явления переноса в газах состоят в том, что в них возникает упорядоченный, направленный перенос массы (диффузия), импульса (внутреннее трение) и внутренней энергии (теплопроводность). При этом в газах нарушаются полная хаотичность движения молекул и максвелловское распределение молекул по скоростям. Отклонениями от закона Максвелла объясняется направленный перенос физических характеристик вещества в явлениях переноса. В простейших случаях одномерных явлений переноса физические величины, определяющие эти явления, зависят только от одной декартовой координаты.

Рассмотрим подробнее явление теплопроводности. Теплопроводность осуществляется при условии наличия разности температур. Например, две противоположные стенки сосуда с газом могут иметь разные значения температуры, поддерживаемые внешними источниками. Тогда молекулы газа в разных местах его объема будут иметь различные средние значения кинетической энергии. В этих условиях хаотическое тепловое движение молекул приведет к направленному переносу энергии в форме теплоты. Молекулы, перешедшие из нагретых частей объема газа в более холодные, в процессе молекулярных соударений отдают часть своей средней кинетической энергии окружающим молекулам. Наоборот, медленно движущиеся молекулы, переходя из менее нагретых частей объема газа в более нагретые, увеличивают свою среднюю кинетическую энергию за счет соударений с молекулами, имеющими большие скорости.

При одномерной теплопроводности, когда температура газа зависит только от одной координаты $T=T(z)$, перенос энергии в форме теплоты происходит вдоль оси OZ , причем справедлив закон Фурье

$$q = -\alpha \frac{dT}{dz} \cdot S \quad (13)$$

Здесь q - поток тепла через поверхность S , расположенную перпендикулярно оси z , dT/dz - градиент температуры (точнее - проекция градиента температуры на ось x , но, следуя традиции, будем называть входящие в уравнения переноса величины вида dT/dx градиентом); α - коэффициент пропорциональности, зависящий от свойств среды и называемый коэффициентом теплопроводности.

Размерности в системе СИ величин, входящих в (13):

$[q]$ - Дж/с, т.е. Вт (ватт), $[\alpha]$ - Вт/(м·К).

Знак минус в законе Фурье отражает то обстоятельство, что тепло течет в направлении убывания температуры. Поэтому знаки q и dT/dz противоположны.

Из молекулярно-кинетической теории газов для коэффициента теплопроводности в газах можно получить выражение

$$\alpha = \frac{1}{3} \langle v \rangle \cdot \langle \lambda \rangle \cdot \rho \cdot C_v \quad (14)$$

где $\langle v \rangle$ - средняя арифметическая скорость теплового движения молекул;

$\langle \lambda \rangle$ - средняя длина свободного пробега;

ρ - плотность вещества;

C_v - удельная теплоемкость газа в изохорическом процессе.

Как видно из (14), коэффициент теплопроводности α не зависит от давления газа. Этот факт, впервые обнаруженный Максвеллом, вначале кажется парадоксальным, хотя он и согласуется с данными экспериментов в случае не слишком разреженных газов.

Экспериментально коэффициент теплопроводности для газов может быть определен следующим методом. По оси цилиндрической трубки, внутри которой находится исследуемый газ, помещается тонкая проволока. Если проволоку нагревать током, а температуру стенки трубки поддерживать постоянной, то в направлении радиуса трубки возникает градиент температуры (рис. 1). Через любую цилиндрическую поверхность, ось которой совпадает с проволокой, за единицу времени пройдет количество теплоты, определяемое выражением

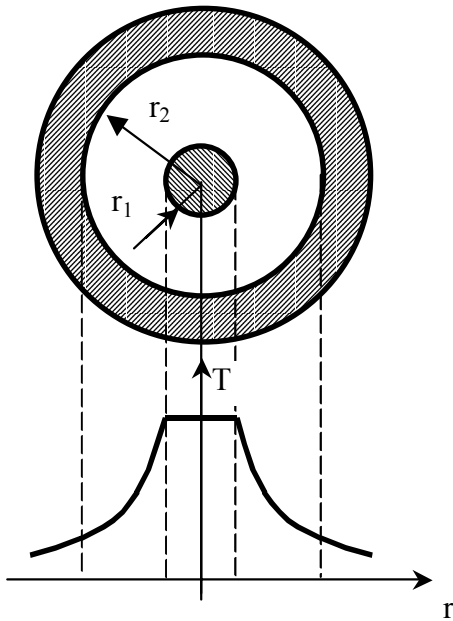


Рис. 1

$$q = -\alpha \cdot 2\pi r \cdot L \cdot \frac{dT}{dr},$$

где L - длина проволоки; r - радиус цилиндрической поверхности. Для процесса, не меняющегося во времени, q - величина постоянная. Разделив в этом выражении переменные $q \cdot (dr/r) = -\alpha \cdot 2\pi L dT$ и проинтегрировав его, получим в конечном виде для α :

$$\alpha = \frac{q \ln(r_2/r_1)}{2\pi L (T_1 - T_2)}, \quad (15)$$

где r_2 - внутренний радиус трубки; T_2 - температура газа у внутренней поверхности трубки; r_1 - радиус проволоки, T_1 - температура проволоки.

Таким образом, чтобы определить коэффициент теплопроводности, необходимо знать количество теплоты, переносимое от проволоки к стенке трубки путем теплопроводности, и разность температур между слоями газа, непосредственно прилегающими к поверхностям проволоки и трубки (так как перепадом температур в стенке трубки можно пренебречь, то

будем считать, что T_2 - равна температуре самой трубки или в конечном итоге температуре окружающей среды).

Температуру проволоки T_1 можно определить, измерив изменение ее электрического сопротивления при нагревании. Известно, что сопротивление проволоки связано с температурой линейным соотношением

$$R=R_0[1+\alpha(T-273)], \quad (16)$$

где R_0 - сопротивление проволоки при $T_0=273$ К (0°C); R - ее сопротивление при T , К;
 α - температурный коэффициент сопротивления, определяющий, на сколько увеличится сопротивление проволоки ($\Delta R/R_0$) при увеличении температуры на один градус.

Измерив сопротивление проволоки R_2 до ее нагревания (т.е. при температуре T_2 , равной температуре стенки трубки), а затем сопротивление R_1 при ее нагревании до температуры T_1 , и зная температурный коэффициент сопротивления вещества проволоки α , получим

$$T_1 = \frac{R_1 [1 + \alpha(T_2 - 273)] - R_2}{\alpha R_2} + 273. \quad (17)$$

Считая, что все тепло, выделяемое током в проволоке в единицу времени $q'=I^2 R_1$ переносится от проволоки к трубке путем теплопроводности, подставим в формулу (15) значение $q=q'$ и T_1 , из уравнения (17), тогда для коэффициента теплопроводности получим

$$\alpha = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi L} \cdot \frac{I^2 R_1 \cdot R_2 \cdot \alpha}{(R_1 - R_2)[1 + \alpha(T_2 - 273)]}. \quad (18)$$

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Задание 1. Определение молярной теплоемкости воздуха проточным методом.

Теплоемкость газа при постоянном давлении C_p можно определить проточным методом. Суть его заключается в следующем.

Предположим, что через нагревательный элемент мощностью q в единицу времени прокачивается объем газа G (расход), температура которого повышается на ΔT . Полагая, что практически все количество тепла, выделяющееся в нагревательном элементе в единицу времени, расходуется на нагрев газа, запишем

$$q = \rho \cdot G \cdot C_p \cdot \Delta T / \mu = \frac{\dot{m}}{\mu} \cdot C_p \cdot \Delta T, \quad (19)$$

где $\dot{m} = \rho \cdot G$ - массовый расход газа, кг/с;

ρ - плотность воздуха при нормальных условиях, кг/м³;

G - объем воздуха, протекающего в единицу времени, м³/с;

C_p - молярная теплоемкость газа при постоянном давлении, Дж/(моль·К);

μ - масса моля газа. Из уравнения (19) найдем искомую величину

$$C_p = \frac{q\mu}{\rho G \cdot \Delta T} \quad (20)$$

Таким образом, для определения теплоемкости проточным методом необходимо в ходе эксперимента измерить количество тепла, выделяющееся в единицу времени, расход воздуха и перепад температур ΔT .

Экспериментальная установка состоит из следующих основных элементов (рис. 2):

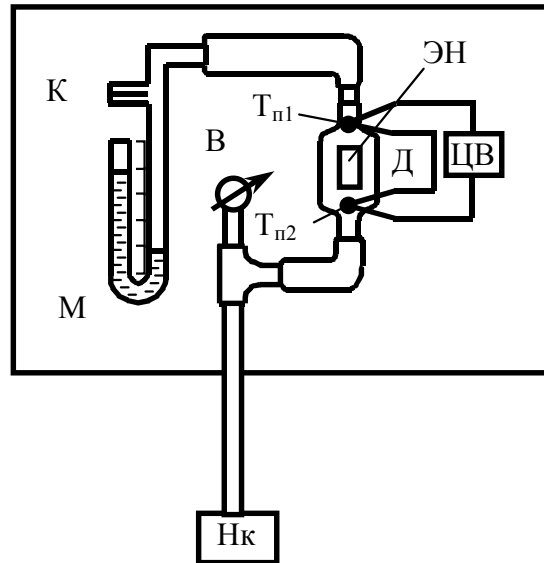


Рис. 2

датчика D , измерительного манометра M , регулировочного вентиля B , нагнетающего компрессора $Нк$, шлангов для соединения различных элементов. В состав установки также входят: источник тока Б5-49 (на рисунке не представлен), служащий для питания электронагревателя; цифровой вольтметр (ЦВ) В7-27, предназначенный для определения ЭДС термопары. Датчик D представляет собой стеклянную трубку, по которой протекает воздух. В трубку введен нагревательный элемент $ЭН$, выполненный из нихромовой проволоки и термопары.

В данной установке для определения ΔT используется термопара из специальных сплавов (хромель-алюмель), которая обладает высокой чувствительностью и отличается линейной зависимостью между ЭДС и разностью температур ее спаев.

Один спай помещен в поток воздуха до нагревателя ($T_{п2}$ - холодный), другой - после ($T_{п1}$ - горячий). Определить разность температур между спаями термопары можно следующим образом:

$$\Delta T = (1/\beta) \cdot U \quad (21)$$

где U - показания цифрового вольтметра (ЦВ), мВ;

β - чувствительность термопары, $\beta = 0,04$ мВ/К.

Воздух нагнетается при помощи компрессора мембранного типа. Расход воздуха, прошедшего через датчик D , измеряется расходомером, состоящим из капиллярной трубки K и манометра M . Манометр предназначен для измерения перепада давления на капиллярной трубке, возникающего при протекании воздуха через капилляр. Расход воздуха можно также определить при помощи тарировочной кривой $G=f(H)$, расположенной на панели лабораторной установки.

Расход воздуха через датчик регулируется вентилем B за счет стравливания в атмосферу части воздуха, поступающего от компрессора.

Для расчета теплоемкости воспользуемся формулой (20), которую можно для данной установки записать в виде

$$C_{\mu} = \frac{\mu I^2 r}{\rho G \cdot \Delta T}, \quad (22)$$

где r - сопротивление нагревателя;

I - ток через нагреватель.

Выполнение эксперимента

1. Перед включением установки проверить, чтобы ручка вентиля B на панели установки находилась в вертикальном положении (вентиль открыт); переключатель рода работы на передней панели цифрового вольтметра В7-27 был в положении 100 мВ; переключатели на передней панели источника питания Б5-49 находились в положении 10,0 В и 000 мА.
2. Включить в сетевую розетку вилку воздушного компрессора.
Внимание! Категорически запрещается вращать регулировочные винты, расположенные на корпусе компрессора.
3. Вращая ручку вентиля B , установите разность высот столба жидкости в манометре ~ 30 мм.
4. Включить тумблер "Сеть" источника питания электронагревателя (при этом на передней панели прибора должна загореться лампочка "Режим стабилизации по току").
5. Включить тумблер "Сеть" вольтметра и убедиться, что шкала прибора имеет нулевые показания.
6. Установить правым переключателем на передней панели источника питания ток 600 мА.
7. По истечении 2-3 мин снять показания вольтметра и занести в таблицу.
8. Устанавливая значения тока правым переключателем цифрового вольтметра последовательно 600, 700, 800 мА, снять показания цифрового вольтметра и результаты занести в таблицу.
9. Установить при помощи вентиля B разность высот в манометре 30, 40, 50 мм, повторяя в каждом случае измерение по п. 8. Результаты занести в таблицу.
10. По тарировочной кривой определить расход воздуха и результаты занести в табл. 1.

Таблица 1

Н, мм	I, мА.	U, мВ	G, м ³ /с	ΔT , К	C_p , Дж/(моль·К)	$\Delta C_{pi} =$ $C_{pi} - \langle C_p \rangle$	$(\Delta C_{pi})^2$
30	600						
	700						
	800						
40	600						
	700						
	800						
50	600						
	700						
	800						

11. По формуле (21) рассчитать разность температур холодного и горячего спаев ΔT .
12. Рассчитать C_p по формуле (22). Значение r указано на панели установки.

Обработка результатов эксперимента

Погрешности, возникающие при измерении физической величины, делятся на систематические и случайные.

Систематические погрешности в условиях данного эксперимента возникают в результате следующих причин:

- дополнительного отвода тепла за счет теплопередачи через стенку датчика D ;
- дополнительного отвода тепла по токопроводящим проводам и термопаре.

Вследствие этого количество тепла, идущее на нагрев газа, окажется меньше, чем мощность, выделяемая в нагревателе. Поэтому в результате расчета по формуле (22) получится завышенное значение C_p . Численная оценка погрешности, возникающей в результате указанных выше причин, показывает, что относительную систематическую погрешность измерения C_p можно в среднем принять

$$\Delta_{\text{сист}} = -0,05 \langle C_p \rangle.$$

Приборные погрешности, возникающие в результате конечной точности измерительных приборов (цифрового вольтметра и задающего цифрового источника питания), можно вычислить по формуле

$$\Delta_{\text{пр}} = \langle C_p \rangle \sqrt{4 \left(\frac{\Delta I}{I} \right)^2 + \left(\frac{\Delta U}{U} \right)^2 + \left(\frac{\Delta H}{H} \right)^2},$$

где ΔI и ΔU определяются как 1/3 предельно допустимой погрешности, которая для вольтметра равна минимальной цене деления прибора, а для источника питания - минимальному шагу изменения значения тока. Приборная погрешность измерения высоты столба жидкости в манометре H равна 1/3 цены деления измерительной линейки.

Случайные погрешности являются следствием многочисленных причин, влияние которых не поддается строгому учету. Для того чтобы оценить случайные погрешности, необходимо провести статистическую обработку результатов измерений. Для этого необходимо:

найти среднее арифметическое из серии n измерений по формуле

$$\langle C_p \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_{pi};$$

определить C_{pi} и результаты занести в таблицу;

рассчитать случайную погрешность серии измерений по формуле:

$$\Delta_{\text{сл}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (C_{pi} - \langle C_p \rangle)^2};$$

вычислить полную погрешность серии измерений с учетом случайных и приборных погрешностей

$$\Delta = \sqrt{\Delta_{\text{сл}}^2 + \Delta_{\text{пр}}^2};$$

результат измерений представить в виде

$$C_p = \langle C_p \rangle + \Delta_{\text{сист}} \pm \Delta.$$

Задание 2. Определение коэффициента теплопроводности воздуха.

Экспериментальная установка, схема которой приведена на рис. 3, представляет собой датчик, выполненный в виде стеклянной трубки 1 с внутренним радиусом r_2 , по оси которой натянута тонкая танталовая нить радиусом r_1 (диаметры трубки и нити указаны на панели лабораторной установки). По нити от источника питания 2 (Б5-49) пропускается ток, который и

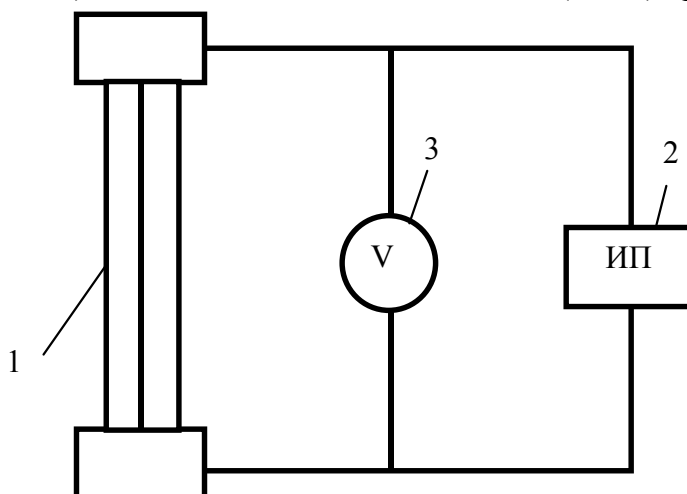


Рис. 3

нагревает ее до определенной температуры. Падение напряжения на нити определяется при помощи цифрового вольтметра 3 (В7-27).

Выполнение эксперимента

1. Перед включением приборов в сеть проверить, чтобы на левом переключателе источника питания было установлено напряжение 10,0 В, на правом переключателе 000 мА, переключатель рода работы цифрового вольтметра находился в положение 10 В.
2. Тумблером "Сеть" включить вольтметр и источник питания.
3. Последовательно установить на правом переключателе источника питания значения тока 50, 400, 500... 1000 мА. При каждом значении тока, после 1-2-минутной выдержки для прогрева нити, снимать показания вольтметра и результаты заносить в табл. 2.

Таблица 2

I, А	U, В	R ₁ , Ом	α, Вт/(м·К)	Δα _i = α _i -<α>	(Δα _i) ²
0,05					
0,4					
0,5					
0,9					
0,99					

4. Рассчитать сопротивление нити $R_1=U/I$ - и результат занести в табл. 2 (при $I = 0,05$ А считать, что $R_1=R_2$).
5. По формуле (18) рассчитать значения коэффициента теплопроводности и результаты занести в табл. 2 (значения α , L указаны на панели лабораторной установки). Температуру T_2 считать равной температуре воздуха в помещении лаборатории.

Обработка результатов эксперимента

Погрешности, возникающие при измерении физической величины, делятся на систематические и случайные.

При использовании данной установки систематические погрешности возникают вследствие:

- дополнительного отвода тепла с поверхности проволоки за счет теплового излучения;
- дополнительного отвода тепла с поверхности проволоки за счет процессов конвективного теплообмена, определяемого движением газа под действием архимедовых сил, вызванных различной плотностью слоев горячего и холодного воздуха;
- дополнительного отвода теплоты через концы проволоки и через торцевую поверхность самой трубки.

Тепловой поток q , передаваемый теплопроводностью, оказывается вследствие названных выше причин несколько меньше, чем количество тепла, выделяемое в проволоке током, поэтому при расчетах получим завышенное значение коэффициента теплопроводности.

Опыт показывает, что в замкнутых пространствах малых размеров конвекция практически отсутствует и процесс передачи тепла определяется только теплопроводностью и излучением. Влияет ли конвекция в данном задании на передачу тепла от проволоки к стенке трубки, можно выяснить путем измерения коэффициента теплопроводности при различных давлениях воздуха в трубке. Количество теплоты, переносимое благодаря конвекции, уменьшается с уменьшением плотности газа, т.е. с уменьшением давления. Действительно, для

средней длины свободного пробега молекулы газа можно записать $\langle \lambda \rangle = \frac{1}{\sqrt{2} \pi n d^2}$, где d - эффективный диаметр молекулы. Подставляя это выражение в формулу (14), получаем

$$\alpha = \frac{\langle v \rangle \rho \cdot C_V}{3 \sqrt{2} \pi n d^2}.$$

Отсюда видно, что коэффициент теплопроводности, а следовательно, и количество тепла, передаваемого теплопроводностью, от давления не зависит. Экспериментальные результаты измерения коэффициента теплопроводности при изменении давления воздуха показывают, что конвекция не влияет на передачу тепла от проволоки к стенке трубки.

Влияние потерь тепла через концы проволоки и через торцевую поверхность самой трубки можно учесть опытным путем, используя два датчика различной длины и одинакового поперечного сечения.

Результаты опыта показывают, что все систематические погрешности невелики и общая величина систематической погрешности может быть принята

$$\Delta_{\text{сист}} = -0,05 \langle \alpha \rangle$$

Важной разновидностью являются приборные погрешности, обусловленные ограниченной точностью измерительных приборов. В данной работе приборами измеряют ток и напряжение. Приборную погрешность можно приблизительно оценить, как

$$\Delta_{\text{пр}} = \frac{2 \langle \alpha \rangle \sqrt{\Delta I^2 + \Delta U^2 / R_2^2}}{\left(I_2 - \frac{U_2}{U_1} I_1 \right)},$$

где ΔI и ΔU определяются как 1/3 предельно допустимой погрешности, которая равна минимальной цене деления прибора;

U_2 - напряжение, соответствующее току $J_2 = 0,05$ А;

U_1 - напряжение, соответствующее току $J_1 = 0,4$ А.

Случайные погрешности являются следствием многочисленных причин, влияние которых не поддается строгому учету. Они могут быть уменьшены, но устранить их невозможно. Однако оценить случайные погрешности можно путем статистической обработки результатов измерений.

Для этого необходимо провести следующие операции:

вычислить среднее арифметическое значение из серии n намерений ($n=7$) по формуле

$$\langle \alpha \rangle = \frac{1}{n} \sum_I \alpha_i;$$

определять среднюю погрешность для $\langle \alpha \rangle$ по формуле

$$\Delta_{\langle \alpha \rangle} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_I (\alpha_i - \langle \alpha \rangle)^2}$$

вычислить полную погрешность серии измерений с учетом случайных и приборных погрешностей

$$\Delta = \sqrt{\Delta_{\langle \alpha \rangle}^2 + \Delta_{\text{пр}}^2};$$

записать результат измерений в виде

$$\alpha = \langle \alpha \rangle \pm \Delta + \Delta_{\text{сист}}$$

Контрольные вопросы

1. Какова размерность молярной теплоемкости?
2. Потому мы считаем, что процесс в данном случае происходит при постоянном давлении?
3. Каким образом в задании 1 определяется разность температур между холодным и нагретым воздухом?

4. Сравните найденное экспериментальное значение C_p со значением, рассчитанным по формуле (11).
5. В процессе при постоянном давлении газ совершает работу над окружающими телами. На что расходуется работа в данном случае?
6. Какова размерность коэффициента теплопроводности?
7. Чем определяется количество тепла, протекающего в единицу времени через заданный элемент поверхности?
8. Как в данной лабораторной установке определяется температура проволоки?
9. Какие причины вызывают появление систематических погрешностей?

Литература

1. Савельев И.В. Курс общей физики: в 3 т. Т.1. М.:Наука, 1982. 432 с.
2. Сивухин Д.В. Общий курс физики: в 5 т. Т. 2. М.:Наука, 1990. 591 с.