

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ ТЕПЛОЕМКОСТИ ВОЗДУХА ПРИ ПОСТОЯННОМ ДАВЛЕНИИ

Цель работы.

Целью лабораторной работы является измерение удельной теплоемкости воздуха при постоянном давлении.

Краткое теоретическое введение.

Теплоемкостью тела C называют отношение бесконечно малого количества тепла δQ , полученного телом, к соответствующему приращению dT его температуры

$$C = \frac{\delta Q}{dT}. \quad (1.1)$$

Теплоемкость c тела массой в 1 кг называют удельной (измеряется в единицах [Дж/(кг·К)]), теплоемкость одного моля вещества C называют молярной (измеряется в единицах [Дж/(моль·К)]). Очевидно, что $C = \mu \cdot c$, где μ – молярная масса (кг/моль).

Так же, как и количество тепла, теплоемкость есть функция процесса, и приобретает однозначный смысл при указании условий нагрева. То есть при одной и той же величине δQ приращение температуры dT будут разными в зависимости от того, как меняются внешние параметры (объем V , давление P и т. д.) в процессе нагрева. Соответственно разными будут и теплоемкости, измеренные в разных процессах. На основании формулы

$$\delta Q = dU + \delta A = dU + PdV$$

где U – внутренняя энергия системы, A – работа, перепишем уравнение (1.1)

$$C = \frac{dU + PdV}{dT}, \quad (1.2)$$

и поскольку

$$dU = \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_V dT + \left(\frac{\partial U}{\partial V} \right)_T dV,$$

получим

$$C = \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_V + \left[\left(\frac{\partial U}{\partial V} \right)_T + P \right] \frac{dV}{dT}. \quad (1.3)$$

В термодинамике особое значение имеют теплоемкости C_V и C_P в процессах с фиксированным объемом образца ($V = const$) и при фиксированном давлении ($P = const$). Из соотношения (1.3) очевидно, что

$$C_V = \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_V.$$

В свою очередь, при постоянном давлении формула (1.3) переходит в

$$C_P = \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_V + \left[\left(\frac{\partial U}{\partial V} \right)_T + P \right] \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_P. \quad (1.4)$$

В настоящей работе удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении c_P определяется экспериментально следующим образом.

Схема экспериментальной установки.

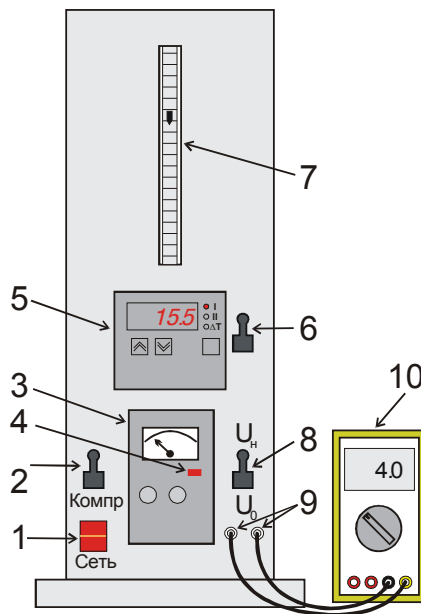


Рис. 1 Общий вид установки:

- 1 – тумблер «Сеть».
- 2 – тумблер включения компрессора
- 3 – источник питания
- 4 – тумблер включения источника питания
- 5 – измеритель температуры
- 6 – тумблер включения измерителя температуры
- 7 – ротаметр
- 8 – тумблер переключатель для измерения напряжения на нагревателе и падения напряжения на образцовом сопротивлении
- 9 – клеммы подключения мультиметра
- 10 – мультиметр

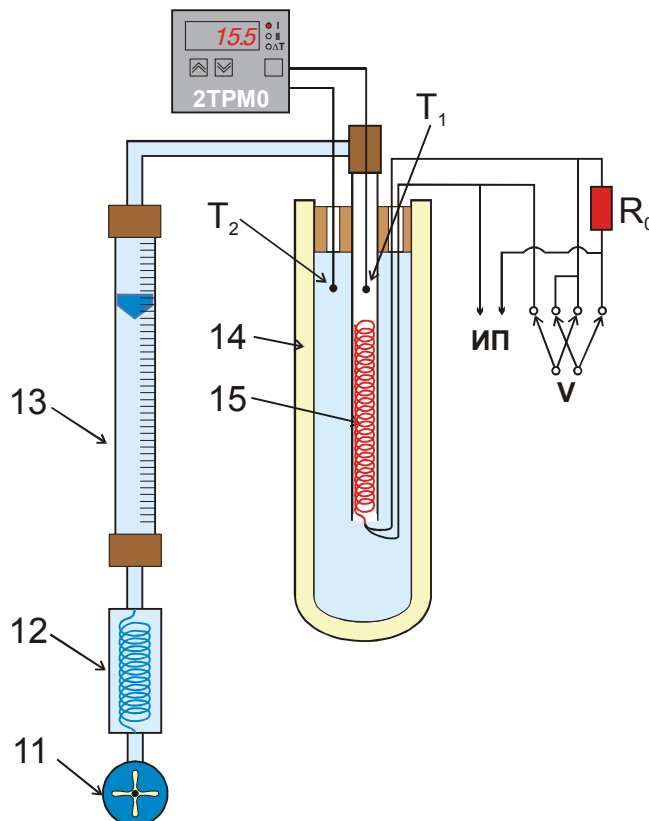


Рис. 2 Рабочий участок установки

- 11 – компрессор
- 12 – холодильник
- 13 – ротаметр
- 14 – сосуд Дьюара
- 15 – нагреватель
- T_1 – термопара 1, измеряющая температуру воздуха до нагрева
- T_2 – термопара 2, измеряющая температуру воздуха в сосуде
- $R_0 = 0.1 \Omega$ – образцовое сопротивление
- V – клеммы подключения мультиметра
- ИП – источник питания

Воздух при температуре T_1 компрессором (11) через холодильник (12) и ротаметр (13) подается в сосуд Дьюара (14). В трубке (15) находится нихромовый нагреватель, к которому последовательно подсоединено образцовое сопротивление $R_0 = 0.1 \Omega$. Протекая через трубку с нагревателем (15), воздух нагревается. Мощность W , выделяемая нагревателем, а, следовательно, и количество тепла, передаваемое воздуху, определяется как произведение напряжения на силу тока. Напряжение на нагревателе U_H измеряется вольтметром V . Сила тока определяется через падение напряжения U_0 на образцовом сопротивлении R_0 . Температура воздуха T_1 на входе в сосуд Дьюара и T_2 на выходе после нагрева измеряется прибором 2ТРМО. Объемный расход воздуха измеряется ротаметром (13). В этом случае удельная теплоемкость воздуха может быть определена по формуле

$$c_P = \frac{W - W_{loss}}{\Delta m (T_2 - T_1)} \quad (1.5)$$

где W – мощность, выделенная на нагревателе, W_{loss} – потерянная мощность, Δm – массовый расход воздуха (кг/сек). Таким образом, удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении определяется непосредственно по формуле (1.1).

Порядок проведения работы:

1. Подсоединить мультиметр (10) к клеммам (9) на установке.
2. Включить питание установки тумблером (1), измеритель температуры (5) тумблером (6), компрессор тумблером (2).
3. Включить питание нагревателя кнопочным выключателем (4) на источнике питания (3). С помощью регуляторов «грубо» и «точно» установить начальное напряжение на нагрузке $U_H = 4В$, отслеживая его значение с помощью мультиметра.
4. С помощью мультиметра измерить падение напряжения на образцовом сопротивлении U_0 , переключая тумблер (8) в соответствующее положение.
5. Через 4-5 минут произвести отсчет температур T_1 и T_2 по измерителю 2ТРМО (5) и объемного расхода воздуха G по ротаметру (7) (ниже смотри описание градуировки ротаметра).
6. Данные измерений занести в таблицу 1.
7. Повторить измерения, описанные в пунктах 4 – 6, для напряжений на нагревателе $U_H = 6, 8, 10, 12 В$.
8. По величине измеренного объемного расхода воздуха G рассчитать массовый расход воздуха Δm

$$\Delta m = G \cdot \rho_{воздух}, \text{ [кг/сек]}. \quad (1.6)$$

Плотность воздуха рассчитать для текущих условий эксперимента (подробно см. ниже)

9. Используя величину падения напряжения U_0 на образцовом сопротивлении R_0 вычислить силу тока

$$I = \frac{U_0}{R_0}, [A]$$

10. Вычислить мощность, выделяемую в нагревателе

$$W = U_H I, [Вт]$$

11. Для нахождения удельной теплоемкости воздуха при постоянном давлении построить график температурной зависимости выделяемой мощности

$$W = f(\Delta T) = c_P \cdot \Delta m \cdot (T_2 - T_1) + W_{loss}. \quad (1.7)$$

Определить параметры линейной функции $y = kx + y_0$, где $y = W$,

$$k = c_P \cdot \Delta m \text{ и } y_0 = W_{loss}.$$

12. Оценить погрешность измерений.

Таблица 1.

№	$t_1, ^\circ\text{C}$	$t_2, ^\circ\text{C}$	$\Delta t, ^\circ\text{C}$	$U_0, \text{В}$	$U, \text{В}$	$I, \text{А}$	$W, \text{Вт}$	$G, \text{л/час}$	$\Delta m, 10^{-5} \text{ кг/сек}$
1.					4.0				
2.					6.0				
3.					8.0				
4.					10.0				
5.					12.0				

Оценка плотности воздуха при атмосферной температуре и атмосферном давлении производится на основании закона Менделеева-Клапейрона в предположении идеальности воздуха. Уравнение состояния ν молей идеального газа

$$PV = \nu RT,$$

где P – давление газа, V – объем газа, T – его температура в $^\circ\text{K}$, $R = 8.31 \text{ Дж/(моль}\cdot\text{K)}$ – универсальная газовая постоянная. Умножая на молекулярную массу воздуха $\mu \approx 0,029 \text{ (кг/моль)}$, для плотности воздуха получим следующее выражение

$$\rho \approx \mu \frac{\nu}{V} = \mu \frac{P}{RT}, \left[\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right]. \quad (1.8)$$

Пересчет атмосферного давления из единиц мм.рт.ст. в Па осуществляется согласно соотношению

$$1 \text{ мм.рт.ст.} = 133.322 \text{ Па}.$$

Кроме формулы (1.8) можно использовать эмпирическую формулу

$$\rho = 0.46387 \frac{P}{T}, \left[\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right], \quad (1.9)$$

где P – атмосферное давление в мм.рт.ст., T – температура в °К.

Градуировка ротаметра

Ротаметр – прибор для определения объемного расхода газа в единицу времени. Для определения объемного расхода воздуха шкала прибора градуирована следующим образом (см. также рис. 3):

Таблица 2.

Отметка шкалы	0	20	40	60	80	100
G_{zp} – Расход воздуха (л/ч)	12,2	59,1	112	153	211	261
Условия градуировки: температура $T = 24$ °С, атмосферное давление $P = 755$ мм.рт.ст.						

При измерении расхода воздуха в условиях отличных от условий градуировки необходимо ввести следующую поправку

$$G = G_{zp} \sqrt{\frac{\rho_{zp}}{\rho}}$$

где G и ρ – объемный расход и плотность воздуха в условиях эксперимента, G_{zp} и ρ_{zp} – объемный расход и плотность воздуха при градуировке (условия градуировки см. в таблица 2). Для расчета массового расхода Δm по формуле (1.6) и последующего использования необходимо перевести Q из единиц [литр/час] в единицы [м³/сек].

Контрольные вопросы к работе:

- 1.
- 2.
- 3.

Литература

1. Сивухин Р.В. Общий курс физики: В 3 т. Т.2. Термодинамика и молекулярная физика. М., 1976.
2. Матвеев А.Н. Молекулярная физика. М., 1987.

Дополнительная литература

1. Кикоин И.К., Кикоин А.К. Молекулярная физика. М., 1976.
2. Савельев И.В. Курс общей физики: В 3 т. М., 1976. Т.1.
3. Телеснин Р.В. Молекулярная физика. М., 1973.
4. Рейф Ф. Статистическая физика. М., 1972.

Градуировка ротаметра

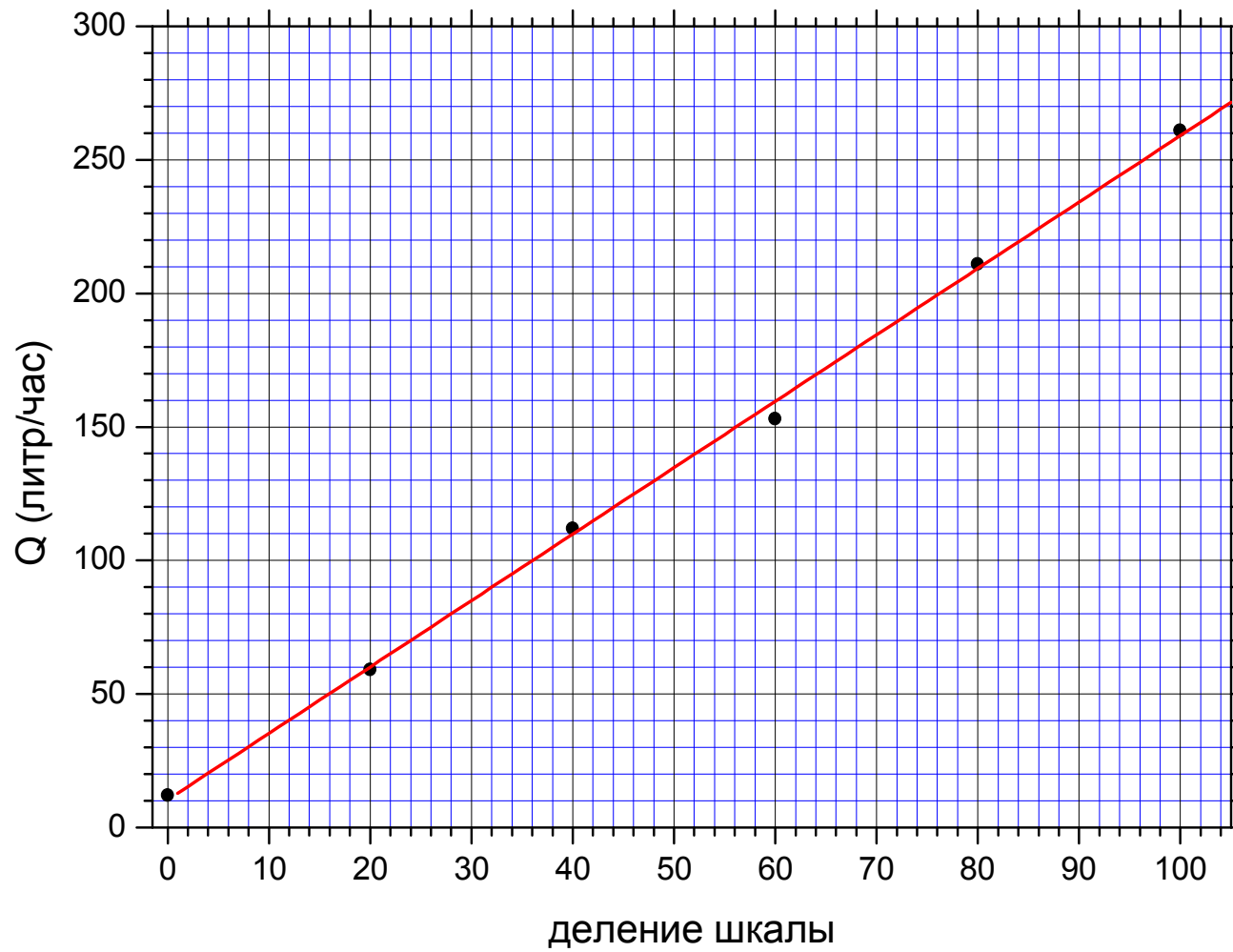


рис. 3

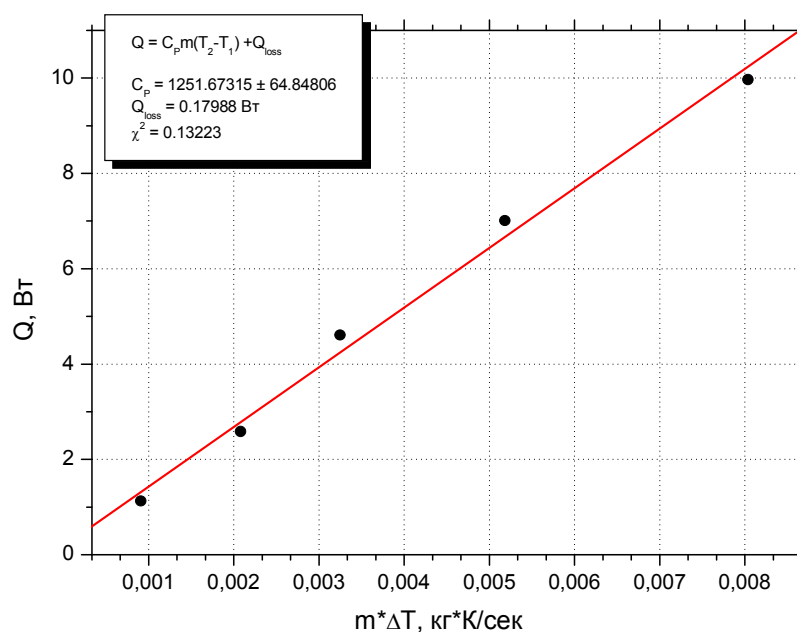
Тестовый вариант выполнения работы.

плотность воздуха при $T=15^{\circ}\text{C}$ получили $\rho = 1.187 \text{ кг/м}^3$

Таблица 1.

№	$t_1, ^{\circ}\text{C}$	$t_2, ^{\circ}\text{C}$	$\Delta t, ^{\circ}\text{C}$	$U_0, \text{В}$	$U, \text{В}$	$I, \text{А}$	$P, \text{Вт}$	$G, \text{л/час}$	$m, 10^{-5} \text{ кг/сек}$
1	16,4	29,3	12,9	0,028	3,99	0,28	1,12	214	7,06
2	19,0	48,5	29,5	0,043	6,00	0,43	2,58	214	7,06
3	20,1	66,8	46,7	0,057	8,07	0,57	4,60	211	6,96
4	22,4	96,9	74,5	0,07	10,0	0,70	7,00	211	6,96
5	28,0	143,0	115	0,083	12,0	0,83	9,96	212	6,99

Построим зависимость величины W от изменения температуры $\Delta T = T_2 - T_1$, произведем интерполирование полученных точек методом наименьших квадратов и вычислим значение C_p .



Таким образом, из графика получаем

$$C_p = 1.252 \pm 65.0 \text{ кДж/кг К.}$$

точность 65,0 – точность метода наименьших квадратов (только!).

справочное значение $C_p = 1.005 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$