

РАБОТА ТД-01 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИЗОБАРНОЙ ТЕПЛОЕМКОСТИ ВОЗДУХА

Цель работы – экспериментальное определение средней массовой теплоемкости воздуха при постоянном давлении в диапазоне значений температуры 20...60 °С калориметрическим методом.

Продолжительность работы – 4 ч.

Краткие теоретические сведения

Для вычисления количества теплоты, подводимой (или отводимой от тела) к телу, используется теплоемкость.

Истинной полной теплоемкостью тела (C , Дж/К) массой m (содержащего X моль вещества) называется отношение элементарного количества теплоты δQ , полученной телом в бесконечно малом процессе, к вызванному бесконечно малому изменению температуры dT :

$$C = \frac{\delta Q}{dT}.$$

Теплоемкость однородного вещества пропорциональна его массе m или X моль, содержащимся в данном теле. Поэтому наряду с истинной полной теплоемкостью тела вводят истинные удельные теплоемкости (далее – удельная теплоемкость):

- удельную массовую теплоемкость C_m (Дж/(кг · К)):

$$C_m = \frac{C}{m} = \frac{\partial}{\partial T} \left(\frac{Q}{m} \right);$$

- удельную мольную теплоемкость μC (Дж/(кмоль · К)):

$$\mu C = \frac{C}{X} = \frac{\partial}{\partial T} \left(\frac{Q}{X} \right).$$

Так как количество переданной телу теплоты, приводящей к соответствующему изменению температуры тела, зависит от характера процесса, то теплоемкость тела различна для разных процессов, т. е. является функцией процесса и может изменяться в диапазоне от $-\infty$ до $+\infty$. Теплоемкость любого вещества в адиабатном процессе ($\delta Q = 0$) равна нулю, а теплоемкость в изотермическом процессе ($dT = 0$) формально равна $\pm\infty$.

Среди различных теплоемкостей особое место занимают теплоемкости при постоянных значениях давления $p = \text{const}$ или объема $V = \text{const}$:

$$\begin{cases} C_p = (\partial Q / \partial T)_p = (\partial H / \partial T)_p; \\ C_V = (\partial Q / \partial T)_V = (\partial U / \partial T)_V, \end{cases}$$

где H и U – соответственно энтальпия и внутренняя энергия вещества.

Теплоемкости C_p и C_V являются функциями состояния вещества и всегда положительны. При известных калорическом $U = U(V, T)$ и термическом $p = p(V, T)$ уравнениях состояния вещества соотношение

$$C_p = C_V + \left[p + \left(\frac{\partial U}{\partial V} \right)_T \right] \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p \quad (1.1)$$

позволяет установить связь между теплоемкостями C_p и C_V . В частности, для идеального газа, для которого $U = U(T)$ и $pV = mRT$, формула (1.1) может быть записана в виде соотношения Майера:

для полных теплоемкостей –

$$C_p = C_V + mR,$$

для удельных теплоемкостей –

$$\begin{cases} C_{pm} = C_{Vm} + R; \\ \mu C_p = \mu C_V + R_0, \end{cases}$$

где $R = R_0 / \mu$ кДж/(кг · К) – индивидуальная газовая постоянная газа с молярной массой μ , кг/кмоль; $R_0 = 8,314$ кДж/(кмоль · К) – универсальная газовая постоянная.

Теплоемкости C_p и C_V зависят от термодинамических параметров, и прежде всего от температуры. Для идеальных газов в области температур $300 \text{ К} < T < 600 \text{ К}$ (когда можно пренебречь энергией электронного возбуждения и колебательного движения молекул газа) можно считать теплоемкости газов μC_p и μC_V постоянными и вычислять их по формулам, полученным методами статистической физики:

$$\begin{cases} \mu C_p = \frac{i+2}{2} R_0; \\ \mu C_V = \frac{i}{2} R_0, \end{cases} \quad (1.2)$$

где i – число степеней свободы молекулы газа в поступательном и вращательном движениях ($i=3$ – для одноатомной молекулы, $i=5$ – для двухатомной).

В инженерной практике тепловых расчетов используют среднюю теплоемкость \bar{C} , равную отношению количества теплоты Q к изменению температуры $\Delta T = T_2 - T_1$ в данном процессе:

$$\bar{C} = \frac{Q}{T_2 - T_1}. \quad (1.3)$$

Связь между истинной и средней теплоемкостями выражается в виде

$$\bar{C} = \frac{1}{\Delta T} \int_{T_1}^{T_2} C(T) dT. \quad (1.4)$$

Теплоемкость, определяемую формулами (1.3) и (1.4), называют среднеинтегральной теплоемкостью в интервале температур $T_1 \dots T_2$ (чтобы подчеркнуть это, иногда применяют обозначение $\bar{C}_{T_1}^{T_2}$).

Калориметрический метод определения теплоемкости газов и паров

Теплоемкость вещества, как правило, определяют калориметрическим методом, суть которого заключается в вычислении количества теплоты, подводимой к веществу (количество вещества должно быть известно), и в измерении его температуры. Во многих случаях при проведении калориметрических экспериментов подвод теплоты осуществляют с помощью электрического нагревателя, а количество выделяемой теплоты рассчитывают по закону Джоуля. Для определения теплоемкости газов и паров применяют так называемые проточные калориметры, через которые исследуемое вещество непрерывно прокачивают с постоянным расходом. При этом в силу малости гидравлических потерь давление текущего газа можно считать постоянным, а следовательно, подвод теплоты к газу в такой системе будет происходить при условии $p = \text{const}$.

При экспериментальном определении средней массовой изобарной теплоемкости воздуха в общем случае следует пользоваться формулой

$$\bar{C}_{pm} = \frac{P_{\text{эл}} \tau - Q_{\text{п}} - Q_{\text{кал}}}{m[(t_2 - t_1) - \Delta t_{\Gamma}]}, \quad (1.5)$$

где $P_{\text{эл}}$ – электрическая мощность нагревателя калориметра, Вт; τ – время, с; $Q_{\text{п}}$ – потери теплоты в окружающую среду, Дж; $Q_{\text{кал}}$ – теплота, идущая на нагрев деталей калориметра, Дж; m – масса исследуемого вещества, кг; t_1 – температура* на входе в калориметр, °С; t_2 – температура на выходе из калориметра, °С; Δt_{Γ} – изменение температуры газа в результате дросселирования, °С.

При работе с проточным калориметром измерения можно организовать так, что подведенная теплота не будет расходоваться на нагрев деталей калориметра и теплота $Q_{\text{кал}}$ будет равна нулю. Для

* Здесь и далее измерение температуры в градусах Цельсия связано с тем, что измерительные приборы на экспериментальных стендах градуированы в градусах Цельсия.

этого необходимо после включения нагревателя дождаться установления стационарного состояния, при котором становится неизменной температура t_2 на выходе из калориметра. Это будет означать, что детали калориметра полностью прогреты и подводимая теплота расходуется на нагрев поступающего в калориметр вещества и окружающей среды.

Потерями теплоты в окружающую среду $Q_{\text{п}}$ в данном экспериментальном исследовании можно пренебречь, так как конструкция используемого проточного калориметра выполнена по принципу самоулавливания потерь теплоты. В таком калориметре (рис. 1.1) только небольшая внутренняя часть калориметра имеет более высокую температуру, а температура его корпуса близка к температуре окружающей среды, что и является причиной значительного снижения потерь теплоты.

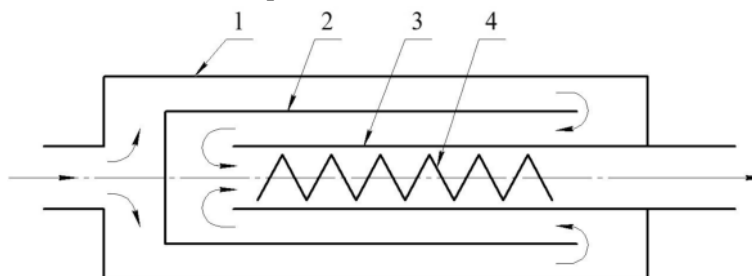


Рис. 1.1. Схема калориметра:

1 – корпус калориметра; 2 – стенки внутренних каналов многоходового теплообменника-калориметра; 3 – стеклянная трубка; 4 – электрический нагреватель

Значением Δt_r в формуле (1.5) можно также пренебречь, так как падение давления воздуха в пределах калориметра пренебрежимо мало. Кроме того, при атмосферном давлении воздух по своим свойствам близок к идеальному газу, для которого дроссель-эффект равен нулю.

Следовательно, для вычисления средней массовой теплоемкости воздуха при постоянном давлении формулу (1.5) упрощают и записывают в виде

$$\bar{C}_{pm} = \frac{P_{\text{эл}}}{G(t_2 - t_1)}, \quad (1.6)$$

где $G = m/\tau$ – расход воздуха, проходящего через калориметр, кг/с.

Описание экспериментальной установки

Рабочий участок экспериментальной установки представляет собой проточный калориметр (см. рис. 1.1), в котором используется принцип самоулавливания потерь теплоты. Электрический нагреватель размещен в центральной стеклянной трубке. Поток воздуха во внешних каналах многоходового теплообменника, которым является калориметр, служит для создания адиабатных условий. Напряжение электрического тока, подводимого к нагревателю, регулируется и измеряется блоком контроля мощности, состоящим из автотрансформатора и цифрового комбинированного прибора Ц4314.

Температура воздуха на входе в калориметр измеряется хромель-копелевой термопарой (ТХК). Разность значений температуры на выходе из калориметра и на его входе измеряется трехспайной дифференциальной термопарой ТХК. Температура регистрируется блоком контроля температуры, состоящим из переключателя и милливольтметра МВУ6-41А.

Движение воздуха через калориметр осуществляется за счет разрежения, создаваемого вакуум-насосом ВН-46М. Расход воздуха регулируется вентилем. Расход воздуха через проточный калориметр измеряется блоком контроля расхода, состоящим из электрического мембранного дифференциального манометра ДМ-Э2 РЗ, миллиамперметра постоянного тока М731А и нестандартной диафрагмы.

Порядок проведения эксперимента

1. Включить электропитание установки (загорится лампа «Сеть») на левой стойке стола экспериментальной установки, затем включить вакуум-насос, нажав красную кнопку на панели блока контроля расхода (загорится лампа «Обдув»). Открыть вентиль трубопровода, вывести ручку автотрансформатора на панели блока контроля мощности против хода часовой стрелки до упора и включить нагреватель (загорится лампа «Нагрев»).

2. Ручкой автотрансформатора установить напряжение электрического тока, подводимого к нагревателю, $U_{\text{наг}} \approx 45 \text{ В}$; вентилем установить расход воздуха, проходящего через калориметр, приближенно равным 70 делениям шкалы миллиамперметра блока контроля расхода воздуха. Дождаться установления стационарного

режима, характеризующегося неизменными показаниями приборов, регистрирующих расход, разность значений температуры и напряжение, подаваемое на нагреватель, и перейти к записи показаний приборов.

3. С помощью цифрового прибора блока контроля мощности измерить падение напряжения на нагревателе, по шкале милливольтметра блока контроля температуры определить температуру на входе в калориметр и зарегистрировать показания дифференциальной термопары, а также показания миллиамперметра блока контроля расхода.

4. Провести аналогичные измерения в соответствии с п. 3 для расхода воздуха, соответствующего 90 и 110 делениям шкалы миллиамперметра блока контроля расхода. Повторить серию измерений при $U_{\text{наг}} \approx 55$ В для трех значений расхода воздуха: 70; 90; 110. То есть эксперимент состоит из шести опытов (режимов).

5. Измерить барометром давление окружающей среды.

6. Результаты измерений записать в журнал наблюдений.

7. По окончании измерений, вращая против хода часовой стрелки ручку автотрансформатора блока контроля мощности, установить напряжение, подаваемое на нагреватель, равным нулю и выключить нагреватель. После того как нагреватель калориметра охладится до температуры окружающей среды, выключить вакуум-насос и закрыть вентиль трубопровода.

Обработка результатов измерений

1. Для каждого из шести режимов по градуировочной характеристике

$$G_{\text{гр}} = 2,40 \cdot 10^{-6} \cdot L + 2,52 \cdot 10^{-4} \quad (1.7)$$

определить массовый расход воздуха $G_{\text{гр}}$, кг/с, проходящего через калориметр, по показаниям миллиамперметра L блока контроля расхода. Определенный расход воздуха соответствует условиям градуировки: $p_{\text{гр}} = 101325$ Па, $t_{\text{гр}} = 20$ °С.

2. Вычислить действительный расход воздуха, соответствующий по условиям эксперимента давлению p и температуре t_1 :

$$G = G_{\text{гр}} \sqrt{\frac{293,15 \cdot p}{101325 \cdot (273,15 + t_1)}}. \quad (1.8)$$

3. Рассчитать электрическую мощность нагревателя калориметра (Вт):

$$P_{\text{эл}} = U_{\text{наг}}^2 / R_{\text{наг}}, \quad (1.9)$$

где $R_{\text{наг}} = (196 \pm 1)$ Ом – сопротивление нагревателя калориметра.

4. Определить разность значений температуры воздуха на выходе из калориметра и на входе в него $t_2 - t_1$. При этом учесть, что показания дифференциальной термопары Δt_2 , °С, соответствуют утроенной разности значений температуры плюс значение температуры окружающей среды. Поэтому $t_2 - t_1 = (\Delta t_2 - t_1) / 3$.

5. Вычислить среднюю изобарную теплоемкость воздуха \bar{C}_{pm} для каждого режима по формуле (1.6).

6. После того как измерена теплоемкость воздуха на всех шести режимах, оценить случайную погрешность измерения. Для этого вычислить среднее арифметическое значение теплоемкости:

$$\langle \bar{C}_{pm} \rangle = \frac{\sum_{i=1}^6 (\bar{C}_{pm})_i}{6},$$

где i – номер режима. Далее рассчитать среднее квадратичное отклонение теплоемкости:

$$\Delta \bar{C}_{pm} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^6 [(\bar{C}_{pm})_i - \langle \bar{C}_{pm} \rangle]^2}{5}}.$$

В рассматриваемом диапазоне значений температуры теплоемкость воздуха постоянна с точностью до четырех значащих цифр, и найденное среднее квадратичное отклонение теплоемкости можно считать случайной погрешностью измерения.

7. Оценить систематическую (методическую) погрешность измерения.

Максимально возможная относительная погрешность измерения изобарной теплоемкости воздуха при атмосферном давлении в соответствии с расчетной формулой (1.6) составляет

$$\delta \bar{C}_{pm} = \delta P_{эл} + \delta G + \delta(t_2 - t_1) + \frac{\partial \bar{C}_{pm}}{\partial t} \frac{\Delta t_1}{\bar{C}_{pm}}, \quad (1.10)$$

где Δt_1 – абсолютная погрешность измерения температуры.

Так как электрическую мощность нагревателя калориметра определяют по падению напряжения, предельную относительную погрешность измерения электрической мощности вычисляют по следующей формуле:

$$\delta P_{эл} = 2\delta U_{наг} + \delta R_{наг}, \quad (1.11)$$

где $\delta U_{наг}$ – относительная погрешность измерения напряжения (при измерении напряжения переменного тока используемым в работе прибором Щ4314 она составляет 1 %); $\delta R_{наг}$ – относительная погрешность измерения электрического сопротивления нагревателя.

Максимально допустимую относительную погрешность измерения расхода следует вычислять по формуле

$$\delta G = \delta G_{гр} + 0,5\delta_p + 0,5\delta t_1, \quad (1.12)$$

где $\delta G_{гр} = 1\%$ – относительная погрешность градуировки диафрагмы совместно с блоком расхода; δ_p – относительная погрешность определения барометрического давления, измеренного барометром с точностью ± 100 Па; δt_1 – относительная погрешность измерения температуры на входе в калориметр, обусловленная погрешностью градуировки термопары ($\Delta t_1 = \pm 0,2$ К) и погрешностью измерительного прибора.

Погрешность измерения разности значений температуры $t_2 - t_1$ обусловлена погрешностью градуировки трехспайной термопары, которая составляет $\pm 0,6$ °С, и максимально допустимой погрешностью измерительного прибора, которая может быть определена на основании его класса точности (класс точности милливольтметра МВУ6-41А – 1,0).

Ошибка отнесения изобарной теплоемкости воздуха по температуре в пределах ее изменения 0...100 °С составляет:

$$\left(\frac{\partial \bar{C}_{pm}}{\partial t}\right) / \bar{C}_{pm} = 0,000067 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}. \quad (1.13)$$

Контрольные вопросы

1. Что такое средняя теплоемкость?
2. Что такое истинная полная теплоемкость?
3. Что такое мольная и массовая истинные удельные теплоемкости?
4. Учитываются ли в данной работе потери теплоты из калориметра в окружающую среду? Почему?
5. Как можно повысить точность определения теплоемкости без уменьшения потерь теплоты в окружающую среду?
6. Каким образом измеряется разность значений температуры на входе в калориметр и на выходе из него?
7. Каким образом можно установить, что нагреватель калориметра охладился до температуры окружающей среды?
8. Рассчитайте средние удельные массовую и мольную теплоемкости воздуха при постоянном объеме.
9. Сравните найденную в эксперименте теплоемкость воздуха с рассчитанной по формуле (1.2).