

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ НЕФТИ И ГАЗА
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)
имени И.М. ГУБКИНА

Кафедра термодинамики и тепловых двигателей

**К.Х. ШОТИДИ, М.М. ШПОТАКОВСКИЙ
М.М. ЧУРИКОВА**

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИЗОБАРНОЙ
ТЕПЛОЕМКОСТИ ВОЗДУХА**

Учебно-методическое пособие

Москва 2018

УДК 536.7

Ч 47

Рецензент:

А.С. Лопатин – доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой термодинамики и тепловых двигателей
РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина

Шотиди К.Х., Шпотаковский М.М., Чурикова М.М.

Определение изобарной теплоемкости воздуха: Учебно-методическое пособие. – М.: Издательский центр РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, 2018. – 30 с.

Рассмотрены основные теоретические аспекты определения теплоемкости газообразного вещества и приведены формулы для расчета изобарной теплоемкости воздуха по результатам эксперимента.

Описана лабораторная работа по расчету удельной изобарной теплоемкости воздуха.

Методические указания ориентированы на курсы «Термодинамика», «Термодинамика и теплопередача», «Техническая термодинамика и теплопередача» и «Теплообменные аппараты» для студентов по направлениям подготовки: 131000 «Нефтегазовое дело», 150700 «Машиностроение», 151000 «Технологические машины и оборудование», 221700 «Стандартизация и метрология», 240100 «Химическая технология», 241000 «Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии», 280700 «Техносферная безопасность».

© Шотиди К.Х., Шпотаковский М.М.,
Чурикова М.М., 2018

© РГУ нефти и газа (НИУ)
имени И.М. Губкина, 2018

Содержание

Введение	4
1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ	5
2. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА «ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИЗОБАРНОЙ ТЕПЛОЕМКОСТИ ВОЗДУХА».....	15
2.1. Описание экспериментальной установки.....	15
2.2. Проведение лабораторной работы.....	18
2.3. Последовательность обработки экспериментальных данных....	20
2.4. Пример обработки экспериментальных данных.....	23
ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ.....	27
Литература.....	29

Введение

Значения *теплоемкости* различных веществ (в основном, жидких и газообразных) и их *характеристик необходимо знать* при решении задач *термодинамики* и *теплопередачи* в различных отраслях промышленности и, в частности, при теплотехнических расчетах *устройств*, где такие вещества являются *рабочими телами*. К характеристикам рабочих тел относятся, например, адиабата, удельные внутренняя энергия, энтальпия и энтропия, а также передаваемое количество теплоты.

Цель лабораторной показать, что удельная изобарная и изохорная теплоемкость различных рабочих тел рассчитывается *только в экспериментах* с ними. Другими словами, значения теплоемкости, приводимые в соответствующей справочной литературе, имеют *экспериментальное*, то есть *опытно-расчетное* происхождение.

В предлагаемой работе приведены основные теоретические положения по определению изобарной и изохорной удельной теплоемкости рабочих тел, а также лабораторная работа по расчету этих теплоемкостей воздуха [1, 2, 3].

1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Истинной удельной теплоемкостью (далее просто «*истинной теплоемкостью*») *рабочего тела* (или просто «*тела*») c_z называется отношение бесконечно малого количества *удельной*, то есть подводимой к *единице* тела или отводимой от нее теплоты δq_z в процессе z , к бесконечно малому изменению температуры этого тела dt [1, 2]

$$c_z = \frac{\delta q_z}{dt}. \quad (1)$$

Символ « δ » в соотношении (1) обозначает *бесконечно малое* изменение количества теплоты q_z , которое *не является полным дифференциалом*.

Если теплообмен δq_z происходит при *постоянном* давлении p ($z \equiv p = idem$), то он называется *изобарным* δq_p ($\delta q_z \equiv \delta q_p$), а теплоемкость тела, определяемая соотношением (1), *изобарной* теплоемкостью c_p : $c_z \equiv c_p$. Здесь и далее «*idem*» обозначает параметр (в данном случае p), имеющий *постоянное* значение в рассматриваемом термодинамическом процессе.

Если же теплообмен δq_z происходит при *постоянном* удельном объеме v ($z \equiv v = idem$), то он называется *изохорным* δq_v ($\delta q_z \equiv \delta q_v$), а теплоемкость тела, определяемая соотношением (1), – *изохорной* теплоемкостью c_v : $c_z \equiv c_v$.

Если *единицей* тела в соотношении (1) является *масса* (например, 1 кг), то δq_z измеряется в Дж/кг, а теплоемкость тела – в Дж/(кг·К). В этом случае теплоемкость называется *массовой* и обозначается « c_z ».

Если *единицей* тела в соотношении (1) является *объем* (например, 1 м³), то δq – измеряется в Дж/м³, а теплоемкость тела – в Дж/(м³·К). В этом случае теплоемкость называется *объемной* и обозначается « c'_z ».

И, наконец, если *единицей* тела в соотношении (1) является 1 кмоль, то δq_z измеряется в Дж/кмоль, а теплоемкость тела – в Дж/(кмоль·К). В этом случае теплоемкость называется *мольной* и обозначается « \bar{c}_z ».

Теплоемкости c'_z и \bar{c}_z связаны с массовой теплоемкостью c_z соотношениями:

$$c'_z = \rho \cdot c_z; \quad (2)$$

$$\bar{c}_z = \mu \cdot c_z. \quad (3)$$

Как правило, в расчетах используется *массовая* теплоемкость тела c_z , называемая в дальнейшем просто «*теплоемкость*».

Изобарная c_p и *изохорная* c_v теплоемкости тела, его *характеристическая* газовая постоянная R , также измеряемая в Дж/(кг·К), связаны между собой соотношением, представляющим собой математическое выражение закона *Майера*, в котором $c_p > c_v$,

$$c_p - c_v = R = \frac{\bar{R}}{\mu}. \quad (4)$$

В соотношении (4) \bar{R} – *универсальная* газовая постоянная рабочего тела, $\bar{R} = 8314$ Дж/(кмоль·К); μ – молярная масса тела.

Для молярных *изобарной* \bar{c}_p и *изохорной* \bar{c}_v теплоемкостей формула (4) принимает вид

$$\bar{c}_p - \bar{c}_v = \bar{R}. \quad (5)$$

В зависимости от *условий* теплообмена теплоемкость тела может изменяться от *минус бесконечности* до *плюс бесконечности*. Если тело *охлаждается* ($\delta q_z < 0$), *сжимаясь так*, что его температура *не изменяется* ($dt = 0$), то теплоемкость будет равна *минус бесконечности*: $c_z = -\infty$. Если же тело *нагревается* ($\delta q_z > 0$), *расширяясь при этом так*, что его температура *не изменяется*

($dt = 0$), то теплоемкость будет равна *плюс бесконечности*:
 $c_z = \infty$.

Физический смысл теплоемкости тела формулируется, исходя из соотношения (1), следующим образом. *Массовая* или *объемная*, или *молярная теплоемкость* тела представляет собой количество теплоты, которое необходимо подвести (или отвести) к 1 кг или к 1 м³, или к 1 кмоль этого тела так, чтобы температура 1 кг или 1 м³, или 1 кмоль этого тела увеличилась (или уменьшилась) на один градус.

Теплоемкость *простых* тел, состояние которых характеризуется *двумя* параметрами (например, давлением p и температурой t), является функцией этих *двух* параметров:

$$c_z = c_z(p, t), \quad (6)$$

в то время как теплоемкость *идеального* газа, состояние которого характеризуется *только одним* параметром (температурой t), является функцией *только* температуры:

$$c_z = c_z(t). \quad (7)$$

В настоящем разделе речь пойдет об определении теплоемкости воздуха при *атмосферном* давлении, при котором воздух по своим свойствам «близок» к *идеальному* газу. Поэтому в дальнейшем рассматривается теплоемкость *идеального* газа, называемого просто «газ».

Если к газу в термодинамическом процессе (1–2) подводится количество теплоты $q_{z(1-2)}$ (под z подразумевается или параметр p , или v), в результате чего температура газа увеличивается от t_1 до t_2 , то его теплоемкость, рассчитываемая по формуле

$$c_{z,m} = \frac{q_{z(1-2)}}{(t_2 - t_1)} = \frac{1}{(t_2 - t_1)} \int_1^2 c_z dt, \quad (8)$$

называется *средней* теплоемкостью в *интервале температур*

($t_1 \div t_2$) в отличие от истинной теплоемкости газа c_z , определяемой соотношением (1).

Для расчета теплоемкости газа $c_{z,m}$ по формуле (8) необходимо знать **вид** зависимости истинной теплоемкости c_z от температуры.

Если исходить из *предпосылки*, что теплоемкость газа не зависит от температуры (рис. 1а), то есть является *постоянной* величиной ($c_z = idem$), то количество теплоты q_z , необходимое для нагревания 1 кг газа в термодинамическом процессе z от 0 °С до температуры t , определяется по формуле

$$q_z = c_z \cdot (t - 0) = c_z \cdot t. \quad (9)$$

В формуле (9) c_z – это *тангенс угла наклона α прямой q_z* к оси абсцисс, то есть *к оси температур* (рис. 1б):

$$c_z = \operatorname{tg} \alpha. \quad (10)$$

Следует отметить, что зависимость теплоемкости газа от температуры в пределах её *небольших интервалов достаточно хорошо* подчиняется *линейному* закону (рис. 1в):

$$c_z = a_0 + a_1 \cdot t. \quad (11)$$

В соотношении (11) коэффициенты a_0 и a_1 определяются экспериментально: a_0 представляет собой *истинную теплоемкость газа при 0 °С*, а a_1 – *тангенс угла наклона α прямой (10)* к *оси температур* ($a_1 = \operatorname{tg} \alpha$) (рис. 1в). График зависимости *теплоты q_z* от *температуры t* будет таким, как на рис. 1г.

Средняя теплоемкость газа на участке (1–2) $c_{z(1-2)}$ является *тангенсом угла наклона секущей (1–2)* к *оси температур α_1* : $c_{z(1-2)} = \operatorname{tg} \alpha_1$ (рис. 1г).

Средняя же теплоемкость газа на участке (2–3) $c_{z(2-3)}$ – это *тангенс угла наклона секущей (2–3)* к *оси температур α_2* : $c_{z(2-3)} = \operatorname{tg} \alpha_2$ (рис. 1г).

Как следует из рисунка 1г, теплоемкость газа $c_{z(1-2)}$ меньше теплоемкости газа $c_{z(2-3)}$:

$$c_{z(1-2)} < c_{z(2-3)}.$$

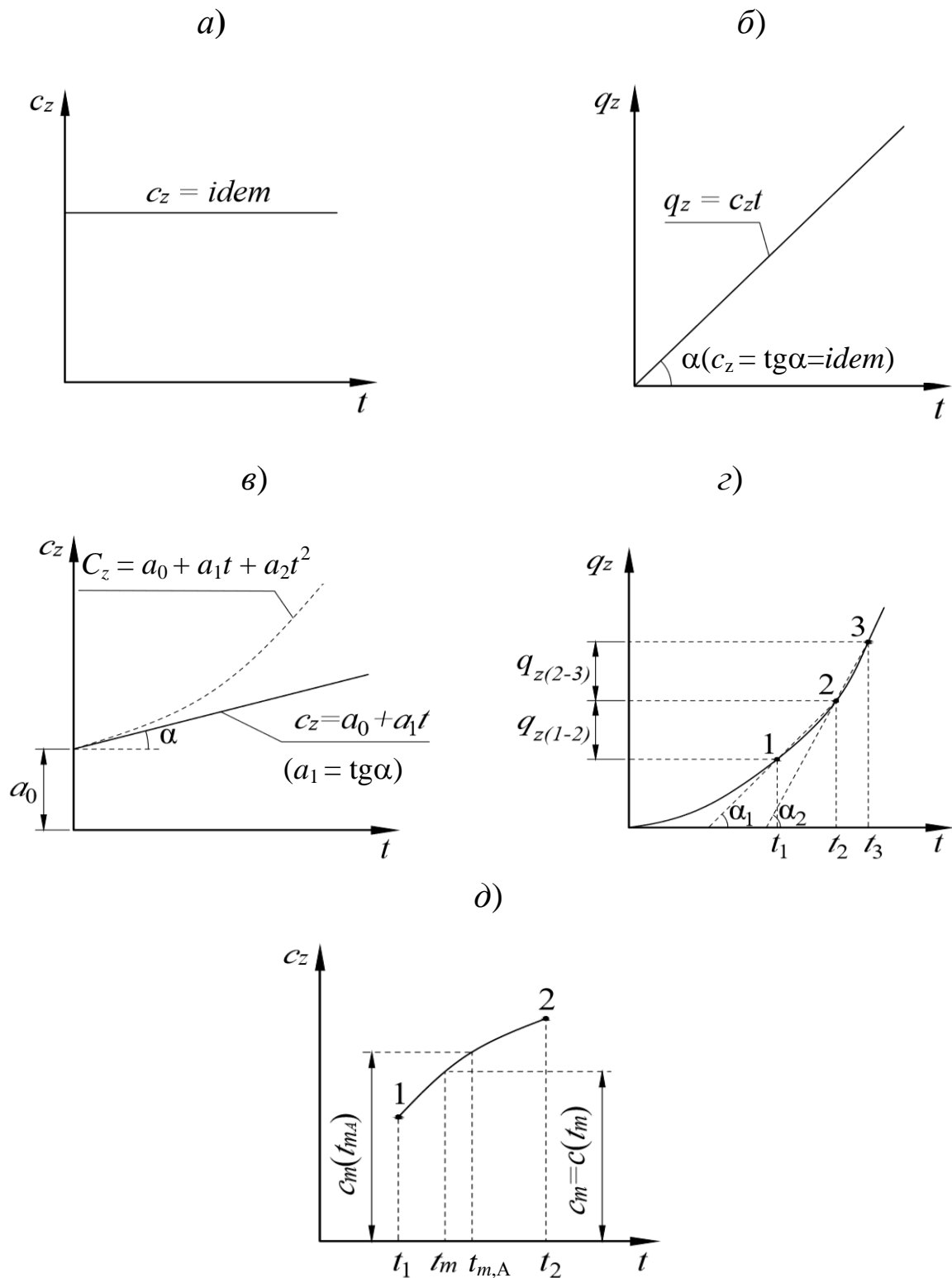


Рис. 1. Теплоемкость рабочего тела

При *линейной* зависимости теплоемкости газа от температуры (соотношение (11)) *средняя* его теплоемкость в диапазоне температур $(t_1 \div t_2)$ $c_{z,m}$ **численно равна истинной** теплоемкости c_z при *средней арифметической* температуре $t_{m,A} = 0,5 \cdot (t_1 + t_2)$ в термодинамическом процессе (1–2) (рис. 1д), то есть

$$c_{z,m} = \frac{1}{(t_2 - t_1)} \int_1^2 (a_0 + a_1 t) dt =$$

$$= a_0 + a_1 \frac{(t_1 + t_2)}{2} = a_0 + a_1 \cdot t_{m,A} = c_{z,m}(t_{m,A}). \quad (12)$$

Нелинейная зависимость истинной теплоемкости газа c_z от его температуры t выглядит следующим образом:

$$c_z = a_0 + a_1 \cdot t + a_2 \cdot t^2 + \dots, \quad (13)$$

причем обычно ограничиваются первыми *тремя* слагаемыми, представляющими собой параболическую зависимость (рис. 1в):

$$c_z = a_0 + a_1 \cdot t + a_2 \cdot t^2. \quad (14)$$

Средняя теплоемкость газа $c_{z,m}$ в диапазоне температур $(t_1 \div t_2)$, как правило, **не равна истинной** по теплоемкости, определенной при *среднеарифметической* температуре $c_{z,A}$ для указанного её диапазона (рис. 1д).

Средняя массовая теплоемкость *смеси* газов $c_{z,m}$ (в Дж/(кг·К)) рассчитывается по формуле [1]

$$c_{z,m} = \sum_{i=1}^N (m_i \cdot c_{z,m,i}), \quad (15)$$

где N – количество компонентов смеси; m_i – массовая концентрация i -го компонента смеси, в долях единицы; $c_{z,m,i}$ – средняя массовая теплоемкость i -го компонента смеси, Дж/(кг·К).

Средняя мольная теплоемкость *смеси* газов $\bar{c}_{z,m}$ (в Дж/(кмоль·К)) определяется по формуле [1]

$$\bar{c}_{z,m} = \sum_{i=1}^N \left(r_i \cdot \bar{c}_{z,m,i} \right). \quad (16)$$

В формуле (16) r_i – мольная концентрация i -го компонента смеси, в долях единицы; $\bar{c}_{z,m}$ – средняя мольная теплоемкость i -го компонента смеси, Дж/(кмоль·К).

Если газовая смесь задана *объемными* концентрациями, то *объемную* теплоемкость смеси при *нормальных* физических условиях можно рассчитать из соотношения, аналогичного (16), с той лишь разницей, что это соотношение, отнесенное к объему 1 кмоль, надо разделить на этот объем \bar{v} , одинаковый при нормальных условиях для всех газов: $\bar{v} = \mu \cdot v = 22,4 \text{ м}^3/\text{кмоль}$ [2].

Следует напомнить, что *нормальными* физическими условиями считаются давление и температура, соответственно, 760 мм рт. ст. и 0 °С.

Таким образом, из изложенного следует, что теплоемкость любого вещества определяется *только в результате эксперимента*.

Формула для расчета изобарной теплоемкости воздуха по результатам эксперимента на лабораторной установке выводится из первого начала термодинамики *по балансу рабочего тела* в дифференциальной форме:

$$\delta Q = \delta Q^* + \delta Q^{**} = dH + \delta W = dH + (\delta W^* + \delta W^{**}), \quad (17)$$

здесь δQ – элементарная приведенная теплота; δQ^* – элементарная теплота, подведенная к воздуху из окружающей среды или отведенная от него в окружающую среду; δQ^{**} – элементарная теплота внутреннего теплообмена; dH – элементарное изменение энтальпии воздуха; δW – элементарная потенциальная работа по перемещению сплошной массы воздуха из области одного давле-

ния в область другого; δW^* – элементарная внешняя потенциальная работа; δW^{**} – элементарная потенциальная работа необратимых потерь.

Кроме того, *важно напомнить*, что δ и d в формуле (16) указывают на то, что изменение рассматриваемой величины является, соответственно, *бесконечно малым* или *полным дифференциалом*.

Поскольку воздух в лабораторной работе по своим свойствам «близок» к *идеальному* газу, показатели δQ^{**} и δW^{**} принимаются равными нулю:

$$\delta Q^{**} = \delta W^{**} = 0, \quad (18)$$

С учетом равенств (18) формула (17) принимает вид:

$$\delta Q = \delta Q^* = dH + \delta W^* = dH - Vdp, \quad (19)$$

где V – объем воздуха; dp – элементарное изменение *абсолютного* давления газа.

Изменение энтальпии *простого* рабочего тела dH в элементарном процессе определяется из соотношения [2]

$$dH = Gdh = G \left[\left(\frac{\partial h}{\partial t} \right)_p dt + \left(\frac{\partial h}{\partial p} \right)_t dp \right], \quad (20)$$

в котором G – масса рабочего тела; dh , dt , dp – изменение, соответственно, удельной энтальпии h , температуры t и абсолютного давления p ;

$$\left(\frac{\partial h}{\partial t} \right)_p = c_p(t, v); \quad (21)$$

$c_p(t, v)$ – изобарная теплоемкость *простого* рабочего тела, являющаяся функцией *двух* параметров состояния – температуры t и удельного объема v .

Поскольку, как уже отмечено, в настоящей работе воздух рассматривается как *идеальный* газ, все его показатели в соответствии с законом Джоуля зависят *только от одного* параметра – *температуры*. Поэтому соотношение (21) записывается следующим образом:

$$\left(\frac{\partial h}{\partial t}\right)_p = c_p(t). \quad (22)$$

Кроме того, поскольку уменьшение давления воздуха при его движении в экспериментальной установке *dp мало*, этим уменьшением *можно пренебречь*:

$$dp \approx 0. \quad (23)$$

С учетом выражений (22) и (23) соотношение (20) принимает вид

$$dH = G \cdot c_p \cdot dt. \quad (24)$$

Формула же (19) после подстановки в нее соотношений (23) и (24) записывается так:

$$\delta Q_p^* = G \cdot c_p \cdot dt. \quad (25)$$

После интегрирования от *первого* состояния воздуха до его *второго* состояния, то есть в результате нагревания в экспериментальной установке, соотношение (25), принимает вид

$$Q_{p(1-2)}^* = G \cdot c_{p(1-2)} \cdot (t_2 - t_1). \quad (26)$$

Из соотношения (26) получаем формулу для расчета изобарной теплоемкости воздуха по результатам эксперимента на лабораторной установке, рассмотренной во втором разделе настоящей работы:

$$c_{m,p(1-2)} = \frac{Q_{p(1-2)}^*}{G \cdot (t_2 - t_1)}. \quad (27)$$

Теплота $Q_{p(1-2)}^*$ в формуле (27) представляет собой $Q_{э.н.}$, под-

водимую к воздуху от электрического нагревателя экспериментальной установки:

$$Q_{p(1-2)}^* = Q_{\text{э.н}} \quad (28)$$

С учетом равенства (28) формула (27) принимает вид

$$c_{p(1-2)} \equiv c_{p,m} = \frac{Q_{\text{э.н}}}{G \cdot (t_2 - t_1)} \quad (29)$$

Поскольку калориметр является *проточным*, подвод теплоты к воздуху *необходимо* отнести к *единице времени*, в частности, к одной секунде. А это значит, что в формуле (29) $Q_{\text{э.н}}$ (в Дж) *надо заменить* на *мощность* электрического нагревателя $N_{\text{э.н}}$, то есть на теплоту, выделяемую нагревателем за одну секунду ($Q_{\text{э.н}} \equiv N_{\text{э.н}}$, где $N_{\text{э.н}}$ измеряется в Вт). Массу же воздуха G (в кг) в формуле (29) *надо заменить* на *массовый его расход* G_c ($G \equiv G_c$, где G_c измеряется в кг/с). Тогда формула (29) для расчета *средней* в интервале изменения температур ($t_1 \div t_2$) *изобарной* теплоемкости воздуха по результатам эксперимента окончательно запишется следующим образом:

$$c_{p,m} = \frac{N_{\text{э.н}}}{G_c \cdot (t_2 - t_1)} \quad (30)$$

2. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА «ОПРЕДЕЛЕНИЕ

ИЗОБАРНОЙ ТЕПЛОЕМКОСТИ ВОЗДУХА»

2.1. Описание экспериментальной установки

Структура формулы (30) позволяет создать экспериментальную установку для определения *удельной изобарной* теплоемкости воздуха при *атмосферном* давлении.

Основным элементом экспериментальной установки является *проточный калориметр*, состоящий из трубки 3, заключенной в сосуд Дьюара 4 (рис. 2а). Атмосферный воздух из лаборатории подается компрессором 6 в трубку 3. С помощью регулятора 7 на компрессоре 6 можно изменять объемный расход воздуха через калориметр, а определять его с помощью ротаметра 8, расположенного на приборной панели 10 экспериментальной установки (рис. 2б). Ротаметр – это расположенная вертикально стеклянная трубка. На ней нанесена равномерная шкала из 100 делений. Под действием восходящего потока воздуха в ротаметре перемещается поплавков 9. Когда подъемная сила воздушного потока становится равной весу поплавка, он «зависает» напротив некоторого деления шкалы, отсчитываемого по верхнему торцу поплавка. Так определяется *безразмерный* (то есть в делениях шкалы ротаметра) расход воздуха. С помощью *тарировочного* графика (рис. 3), являющегося «паспортом» данного ротаметра, *безразмерный* расход воздуха *переводится* в *размерный* объемный расход, в $\text{дм}^3/\text{мин}$. Эта единица *удобна* для построения *экспериментального* графика.

При движении воздуха по трубке 3 от ее входного сечения (точка 1) к выходному сечению (точка 2) к воздуху подводится теплота, выделяемая нихромовым нагревателем 5 (рис. 2а), который расположен в трубке 3 и соединен с лабораторным трансформатором 15.

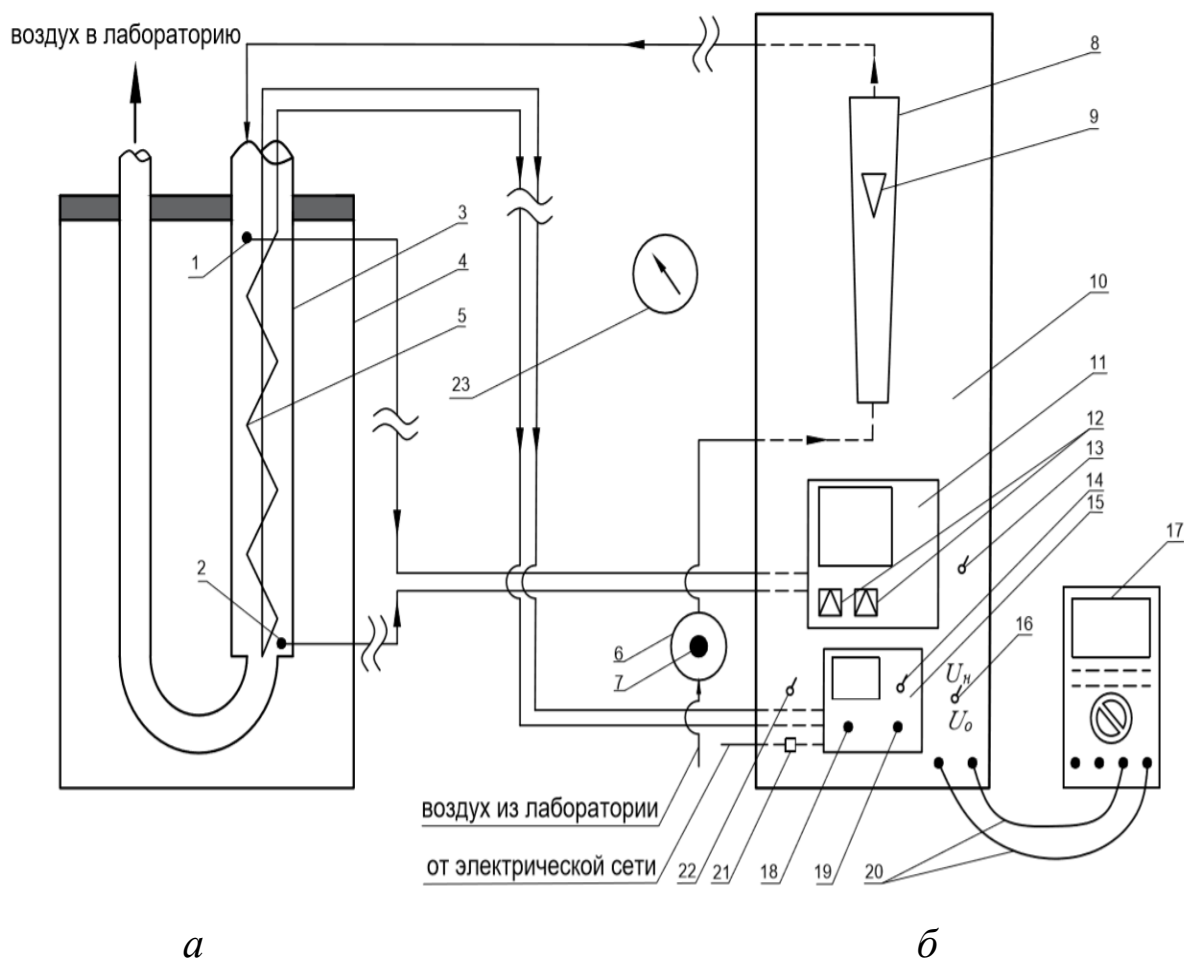


Рис. 2. Схема экспериментальной установки (а) и ее приборная панель (б):

1, 2 – термопары; 3 – трубка калориметра; 4 – сосуд Дьюара; 5 – нагреватель; 6 – компрессор; 7 – регулятор производительности компрессора; 8 – ротаметр; 9 – поплавок ротаметра; 10 – приборная панель экспериментальной установки; 11 – измеритель температур; 12 – клавиши для измерения температуры воздуха; 13 – тумблер включения измерителя температуры воздуха; 14 – тумблер включения лабораторного трансформатора 15; 16 – переключатель для измерения напряжений U_n и U_o ; 17 – мультиметр; 18, 19 – рукоятки соответственно «грубой» и «тонкой» настройки напряжения; 20 – провода; 21 – клавиша «Сеть»; 22 – тумблер включения компрессора; 23 – прибор для измерения давления и температуры воздуха в лаборатории

Температура воздуха в точках 1 и 2 трубки 3 измеряется с помощью хромель-копелевых термопар, подключенных к прибору 11 марки 2ТРМ0 на панели 10 с помощью клавиш 12. Температура воздуха отображается на экране прибора 11 в градусах шкалы Цельсия.

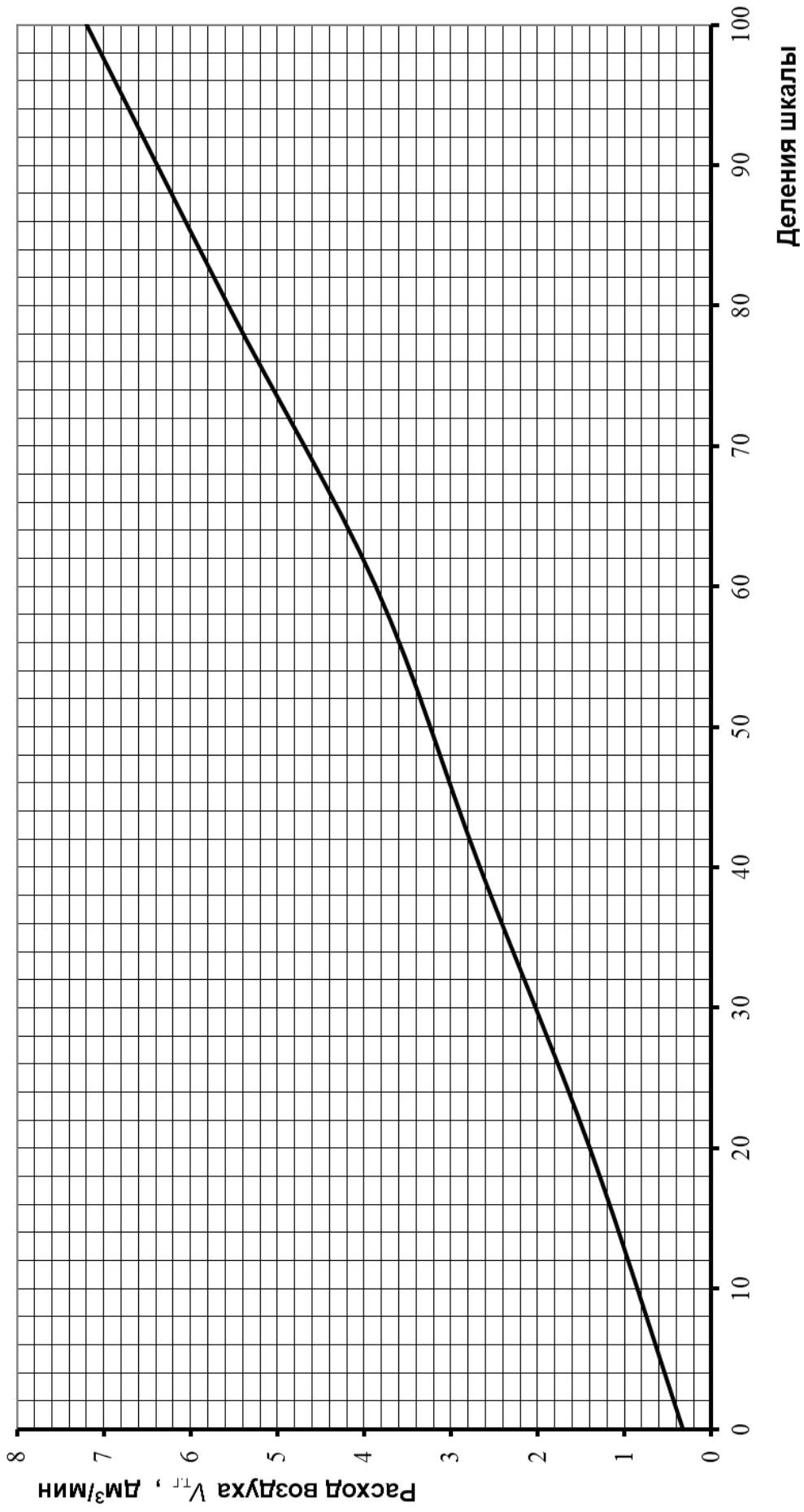


Рис. 3. Тарировочный график для определения расхода воздуха через ротаметр

Поверхность трубки 3 должна быть *теплоизолирована во избежание* теплового взаимодействия воздуха в трубке 3 с окружающей средой. Это значит, что теплота, выделяемая электрическим нагревателем 5 при прохождении по нему тока, *должна по возможности полностью передаваться* воздуху в трубке 3 воздуху, *не попадая* в окружающую среду. Кроме того, проходящий по трубке 3 воздух *не должен нагреваться* теплотой окружающей среды. Эти условия соблюдаются, поскольку трубка 3 *заключена в сосуд Дьюара 4*.

2.2. Проведение лабораторной работы

1) Экспериментальная установка приводится в рабочее состояние, для чего снимаются верхняя металлическая крышка, а также одна или две боковые стеклянные стенки. Это делает лаборант.

2) Мультиметр 17 подсоединяется к лабораторному трансформатору 15 с помощью проводов 20 (рис. 2б).

3) На экспериментальную установку подается напряжение от электрической сети нажатием клавиши 21 («Сеть»).

4) С помощью тумблера 22 запускается компрессор 6, производительность которого можно изменять регулятором 7 (рис. 2а).

5) С помощью тумблера 14 напряжение от электрической сети подается на лабораторный трансформатор 15. Нужно напряжение, отображаемое на экране этого трансформатора, устанавливается рукоятками 18 («Грубо») и 19 («Точно»). *Более точно* это напряжение измеряется мультиметром 17 марки 2ТРМ (рис. 2б).

Регулируя мощность нагревателя 5 с помощью лабораторного трансформатора 15, воздух нагревают в калориметре до 20÷25 градусов. При этом *надо следить*, чтобы температура воздуха *на выходе* из калориметра *не превышала 70 °С во избежание его разрушения!*

При верхнем положении тумблера 16 измеряется напряжение U_H на нагревателе 5, а при нижнем – на образцовом сопротивлении U_o , которое входит в электрическую схему экспериментальной установки (на рис. 2 образцовое сопротивление не показано): его сопротивление $R_o = 0,1$ Ом.

б) Измерения начинаются с *момента установления стационарного теплового* режима работы установки. Момент наступления такого режима определяется по температуре воздуха в сечении 2: эта температура *не должна* изменяться во времени.

Стационарный тепловой режим работы установки достигается, во-первых, при *постоянном расходе воздуха* через калориметр (если необходимо, этот расход, как уже отмечено, можно изменять регулятором 7) и, во-вторых, при *постоянной мощности нагревателя* (если необходимо, эту мощность можно изменять лабораторным трансформатором 15).

7) Результаты измерения показателей работы экспериментальной установки заносятся в табл. 1.

Таблица 1

Значения показателей работы экспериментальной установки по определению изобарной теплоемкости воздуха

Атмосферное давление воздуха – $p_a =$ _____ мм рт. ст.
Температура воздуха на входе в калориметр – $t_a =$ _____ °С

Показатели	Размерность	Номер опыта					Средне-арифметическое значение показателя
		1	2	3	4	5	
Измеряемые показатели							
Температура воздуха на входе в калориметр t_1	°С						
Температура воздуха на выходе из калориметра t_2	°С						

Показатели	Размерность	Номер опыта					Средне-арифметическое значение показателя
		1	2	3	4	5	
Напряжение на нагревателе U_H	В						
Напряжение на образцовом сопротивлении U_o	В						
Объемный расход воздуха по ротаметру $V_{д.ш}$	деления шкалы						
Некоторые расчетные показатели							
Объемный расход воздуха по ротаметру $V_{т.г}$	дм ³ /мин						
Ток в нагревателе I_H : $I_H = (U_o / R_o) =$ $= (U_o / 0,1)$	a						
Мощность нагревателя $N_{э.н}$: $N_{э.н} = U_H \cdot I_H$	Вт						

Для более точного определения показателей работы установки каждый из них измеряется *несколько* раз, причем, исходя из теории вероятностей, эксперимент проводится нечетное число раз.

В данном случае показания всех приборов фиксируются пять раз с интервалом в 3 минуты. Затем определяется среднеарифметическое значение каждого в течение всего эксперимента.

2.3. Последовательность обработки экспериментальных данных

Как отмечено в 2.2, *измеряемые и некоторые расчетные* показатели работы экспериментальной установки, заносятся в табл. 1. В этой таблице приводится также напряжение на образ-

цовом сопротивлении U_o , которое *непосредственно не используется* в расчетах показателей работы установки. Образцовое сопротивление в составе экспериментальной установки обусловлено особенностями ее электрической схемы.

Далее в качестве примера представлена *последовательность обработки* результатов измерений.

1) Массовый (в кг/с) расход воздуха через калориметр G_c определяется так:

$$G_c = \frac{p_1 \cdot V_1}{R \cdot T_1} = \frac{p_1 \cdot V_1 \cdot \mu}{R \cdot (t_1 + 273,15)}. \quad (31)$$

В формуле (31): p_1 – давление воздуха на входе в ротаметр, Па; V_1 – объемный расход воздуха на входе в ротаметр, м³/с; R – характеристическая газовая постоянная для воздуха (в Дж/(кг·К)), связанная с универсальной газовой постоянной \bar{R} ($\bar{R} = 8314$ Дж/(кмоль·К)) соотношением

$$R = (\bar{R} / \mu); \quad (32)$$

μ – молярная масса воздуха, $\mu = 28,96$ кг/кмоль; T_1, t_1 – температура воздуха на входе в ротаметр соответственно в К и в °С: t_1 принимается равной температуре воздуха в помещении лаборатории t_a : $t_1 = t_a$.

Если в формуле (31) p_1 подставить в мм рт. ст. (1 мм рт. ст. = 133,322Па), $V_{т.г.}$ (объемный расход воздуха на входе в ротаметр по тарировочному графику) – в дм³/мин, то эта формула запишется следующим образом:

$$G_c = \frac{133,322 \cdot p_1 \cdot V_{т.г.} \cdot 28,96}{8314 \cdot (t_1 + 273,15) \cdot 10^3 \cdot 60} = 7,74 \cdot 10^{-6} \frac{p_1 \cdot V_{т.г.}}{(t_1 + 273,15)}. \quad (33)$$

2) Средняя изобарная теплоемкость воздуха $c_{p,m}$ (в Дж/(кг·К)) рассчитывается по формуле (30).

3) Средняя изохорная теплоемкость воздуха $c_{v,m}$ (в Дж/(кг·К)) определяется по формуле

$$c_{v,m} = c_{p,m} - R = c_{p,m} - \frac{\bar{R}}{\mu}. \quad (34)$$

4) Вычисляется показатель адиабаты для воздуха:

$$k = \frac{c_{p,m}}{c_{v,m}}. \quad (35)$$

5) Определяется плотность воздуха (в кг/м³) при его параметрах ($p_1 = p_a$, $t_1 = t_a$) на входе в экспериментальную установку ρ_1

$$\rho_1 = \frac{G_c}{V_1} = \frac{G_c}{\frac{V_{т.г}}{10^3 \cdot 60}}. \quad (36)$$

6) По формулам (2) и (3) находятся средние изобарные соответственно объемная $c'_{p,m}$ и молярная $\bar{c}_{p,m}$ теплоемкости воздуха. Теплоемкость $\bar{c}_{v,m}$ можно рассчитать также из формулы (5).

7) Поскольку при абсолютном нуле ($T_0 = 0$ К) энтальпия воздуха принимается равной нулю ($h_0 = 0$), удельная энтальпия воздуха на выходе из калориметра h_2 рассчитывается так:

$$(h_2 - h_0) = h_2 = c_{p,m} \cdot T_2 = c_{p,m} \cdot (t_2 + 273,15). \quad (37)$$

8) Показатели для воздуха, рассчитанные в п.п. 1)–7), необходимо сопоставить с их табличными значениями, которые, в свою очередь, получены в результате *эталонного*, то есть *образцового*, эксперимента. Табличные значения интересующих нас показателей определяются при среднеарифметической температуре $t_{m,A} = 0,5(t_1 + t_2)$. *Относительная* (в %) погрешность определения показателей для воздуха в *нашем* эксперименте, по сравнению с *эталонным* $\delta\Pi$, такова:

$$\delta\Pi = \frac{\Pi_э - \Pi}{\Pi_э} 100, \quad (38)$$

где Π , $\Pi_э$ – значения рассматриваемого показателя соответственно в *нашем* и в *эталонном* экспериментах: $\Pi - c_{p,m}, c_{v,m}, k, h_2$.

2.4. Пример обработки экспериментальных данных

В результате эксперимента получены следующие *среднеарифметические* значения показателей работы установки, необходимые для расчета c_{pm} :

- давление воздуха в помещении лаборатории $p_1 - 755$ мм рт. ст.;
- температура воздуха на входе в калориметр $t_1 - 20,5$ °С;
- температура воздуха на выходе из калориметра $t_2 - 40,0$ °С;
- объемный расход воздуха через ротаметр, определенный по тарировочному графику $V_{т.г} - 37,8$ дм³/мин;
- мощность электрического нагревателя $N_{э.н} - 14,8$ Вт.

Алгоритм обработки экспериментальных данных.

1) Массовый расход воздуха через калориметр G_c определяется по формуле (33):

$$G_c = 7,74 \cdot 10^{-6} \frac{p_1 \cdot V_{т.г}}{(t_a + 273,15)};$$

$$G_c = 7,74 \cdot 10^{-6} \frac{755 \cdot 37,8}{(20,5 + 273,15)} = 7,52 \cdot 10^{-4} \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

2) Средняя изобарная теплоемкость воздуха в интервале температур ($t_1 \div t_2$) $c_{p,m}$ рассчитывается по формуле (30):

$$c_{p,m} = \frac{N_{э.н}}{G_c \cdot (t_2 - t_1)};$$

$$c_{p,m} = \frac{14,8}{7,52 \cdot 10^{-4} \cdot (40,0 - 20,5)} = 1009,3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} = 1,0093 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

3) Средняя изохорная теплоемкость воздуха в интервале температур ($t_1 \div t_2$) $c_{v,m}$ определяется по формуле (34):

$$c_{v,m} = c_{p,m} - R = c_{p,m} - \frac{\bar{R}}{\mu};$$

$$c_{v,m} = 1009,3 - \frac{8314}{28,96} = 722,2 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} = 0,7222 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

4) Показатель адиабаты для воздуха k рассчитывается по формуле (35):

$$k = \frac{c_{p,m}}{c_{v,m}}; \quad k = \frac{1,0093}{0,7222} = 1,398.$$

5) Плотность воздуха при его параметрах ($p_1 = p_a$, $t_1 = t_a$) на входе в лабораторную установку ρ_1 определяется по формуле (36):

$$\rho_1 = \frac{G_c}{V_1} = \frac{G_c}{\frac{V_{т.г}}{10^3 \cdot 60}}; \quad \rho_1 = \frac{7,52 \cdot 10^{-4}}{\frac{37,8}{10^3 \cdot 60}} = 1,194 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

6) Средняя изобарная объемная теплоемкость воздуха в интервале температур ($t_1 \div t_2$) $c'_{p,m}$ рассчитывается по формуле (2):

$$c'_{p,m} = \rho \cdot c_{p,m}; \quad c'_{p,m} = \rho \cdot c_{p,m} = 1,194 \cdot 1,0093 = 1,2051 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}}.$$

7) Средние в интервале температур ($t_1 \div t_2$) молярные изобарная $\bar{c}_{p,m}$ и изохорная $\bar{c}_{v,m}$ теплоемкости воздуха вычисляются по формуле (3):

$$\bar{c}_{p,m} = \mu \cdot c_{p,m}; \quad \bar{c}_{p,m} = 28,96 \cdot 1,0093 = 29,2293 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}};$$

$$\bar{c}_{v,m} = \mu \cdot c_{v,m}; \quad \bar{c}_{v,m} = 28,96 \cdot 0,7222 = 20,9149 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}}.$$

Тот же результат получим, если $\bar{c}_{v,m}$ определим по формуле (5)

$$\bar{c}_{v,m} = \bar{c}_{p,m} - \bar{R}; \quad \bar{c}_{v,m} = 29,2293 - 8314 \cdot 10^{-3} = 20,9153 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}}$$

(небольшое различие в значении $\bar{c}_{v,m}$, рассчитанной двумя способами, обусловлено погрешностью, появляющейся при округлении).

**Термодинамические показатели воздуха
при атмосферном давлении [3]**

Температура		Изобарная теплоемкость c_p , кДж/(кг·К)	Изохорная теплоемкость c_v , кДж/(кг·К)	Удельная энтальпия h , кДж/кг	Показатель адиабаты k
t , °С	T , К				
-50	223,15	1,0019	0,7147	223,6	1,402
-45	228,15	1,0020	0,7147	228,6	1,402
-40	233,15	1,0021	0,7148	233,6	1,402
-35	238,15	1,0021	0,7149	238,7	1,402
-30	243,15	1,0022	0,7150	243,7	1,402
-25	248,15	1,0023	0,7151	248,7	1,401
-20	253,15	1,0025	0,7153	253,8	1,401
-15	258,15	1,0026	0,7154	258,8	1,401
-10	263,15	1,0028	0,7156	263,9	1,401
-5	268,15	1,0030	0,7157	269,0	1,401
0	273,15	1,0031	0,7159	274,0	1,401
5	278,15	1,0032	0,7160	278,0	1,401
10	283,15	1,0034	0,7162	284,1	1,401
15	288,15	1,0036	0,7164	288,2	1,401
20	293,15	1,0038	0,7166	294,3	1,401
25	298,15	1,0040	0,7168	299,3	1,400
30	303,15	1,0043	0,7171	304,5	1,400
35	308,15	1,0046	0,7174	309,6	1,400
40	313,15	1,0049	0,7177	314,7	1,400
45	318,15	1,0053	0,7181	312,8	1,400
50	323,15	1,0057	0,7184	325,0	1,399

8) Удельная энтальпия воздуха на выходе из калориметра h_2 рассчитывается по формуле (37):

$$h_2 = c_{p,m} \cdot T_2 = c_{p,m} \cdot (t_2 + 273,15); \quad h_2 = 1,0093 \cdot (40,0 + 273,15) \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

9) По таблице 2 находим термодинамические показатели для воздуха при атмосферном давлении и среднеарифметической его температуре в калориметре $t_{m,A}$:

$$t_{m,A} = 0,5 \cdot (t_1 + t_2); \quad t_{m,A} = 0,5 \cdot (20,5 + 40,0) = 30,3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

определяются $c_{p,таб}$, $c_{v,таб}$, $k_{таб}$ и $h_{2,таб}$

$$c_{p,таб} = 1,0043 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}; \quad c_{v,таб} = 0,7171 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}};$$

$$k_{таб} = 1,400; \quad h_{5,таб} = 304,8 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

(индекс «таб» указывает, что отмеченные показатели являются табличными).

Приведенные *табличные* значения показателей *сопоставляются* с рассчитанными в *эксперименте*, то есть вычисляются относительные погрешности определения указанных показателей по формуле (38):

$$\delta c_p = \frac{|c_{p,таб} - c_{p,m}|}{c_{p,таб}} 100; \quad \delta c_p = \frac{|1,0043 - 1,0093|}{1,0043} 100 = 0,50\%;$$

$$\delta c_v = \frac{|c_{v,таб} - c_{v,m}|}{c_{v,таб}} 100; \quad \delta c_v = \frac{|0,7171 - 0,7222|}{0,7171} 100 = 0,71\%;$$

$$\delta k = \frac{|k_{таб} - k|}{k_{таб}} 100; \quad \delta k = \frac{|1,400 - 1,398|}{1,400} 100 = 0,14\%;$$

$$\delta h_2 = \frac{|h_{2,таб} - h_2|}{h_{2,таб}} 100; \quad \delta h_2 = \frac{|304,8 - 316,1|}{304,8} 100 = 3,71\%.$$

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Математическим выражением какого закона природы является уравнение первого начала термодинамики?
2. Как формулируется первое начало термодинамики:
 - а) по балансу рабочего тела,
 - б) по внешнему балансу теплоты и работы?
3. Что такое:
 - а) полная (то есть приведенная) теплота,
 - б) теплота внешнего теплообмена (то есть подведенная извне теплота),
 - в) теплота внутреннего теплообмена,
 - г) потенциальная работа?
 - д) внешняя (то есть эффективная или полезная) потенциальная работа,
 - е) потенциальная работа необратимых потерь,
 - ж) энтальпия?
4. Являются ли элементарные теплота и потенциальная работа полными дифференциалами и почему?
5. Что собой представляет:
 - а) истинная теплоемкость рабочего тела,
 - б) средняя теплоемкость рабочего тела.
6. Что такое:
 - а) массовая теплоемкость рабочего тела,
 - б) объемная теплоемкость рабочего тела,
 - в) мольная теплоемкость рабочего тела?
7. Каков физический смысл:
 - а) изобарной массовой теплоемкости газа,
 - б) изохорной массовой теплоемкости газа.
8. Каким соотношением связаны между собой:
 - а) объемная и массовая теплоемкости газа,
 - б) мольная и массовая теплоемкости газа?

9. Каким соотношением связаны между собой изобарная и изохорная теплоемкости газа (массовая и мольная) и математическим выражением какого закона это соотношение является?

10. Как формулируется уравнение Майера и для какого газа (идеального, реального) оно справедливо?

11. Что такое идеальный газ и чем он отличается от реального?

12. При каких условиях реальный газ по своим свойствам «приближается» к идеальному?

13. Функцией каких параметров состояния является теплоемкость:

а) идеального газа,

б) реального газа?

14. Каков физический смысл:

а) универсальной газовой постоянной и чему она равна,

б) характеристической газовой постоянной и каким соотношением она связана с универсальной газовой постоянной?

15. По какой формуле определяется:

а) энтальпия идеального газа,

б) энтальпия реального газа,

в) показатель адиабаты идеального газа?

16. Можно ли, не проводя эксперимент, рассчитать теплоемкость рабочего тела?

17. Почему воздух в лабораторной установке можно рассматривать как идеальный газ?

18. Почему можно утверждать, что при проведении эксперимента теплота подводится к воздуху в проточном калориметре при постоянном давлении?

19. Как надо видоизменить лабораторную установку, чтобы по результатам эксперимента рассчитать изохорную теплоемкость воздуха?

Литература

1. Термодинамика и теплопередача в технологических процессах нефтяной и газовой промышленности: Учебник для вузов / А.Ф. Калинин, С.М. Купцов, А.С. Лопатин, К.Х. Шотиди. – М.: Издательский центр РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, 2016. – 264 с.

2. Теоретические основы теплотехники. Часть I: Термодинамика в технологических процессах нефтяной и газовой промышленности: Учебное пособие/Б.П. Поршаков, А.Ф. Калинин, С.М. Купцов, А.С. Лопатин, К.Х. Шотиди. – М.: Издательский центр РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2005. – 148 с.

3. *Шотиди К.Х., Шпотаковский М.М.* Определение изобарной теплоемкости воздуха: Методические указания к лабораторной работе. – М.: Издательский центр РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2003. – 32 с.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

ШОТИДИ Константин Харлампиевич
ШПОТАКОВСКИЙ Михаил Михайлович
ЧУРИКОВА Мария Михайловна

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИЗОБАРНОЙ ТЕПЛОЕМКОСТИ
ВОЗДУХА**

Редактор: *Л.А. Суаридзе*
Компьютерная верстка: *И.В. Севалкина*

Подписано в печать 04.12.2018. Формат 60×90^{1/16}.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Гарнитура «Таймс».
Усл. п.л. 2,0. Тираж 100 экз. Заказ №

Издательский центр
РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина
Ленинский просп., 65
Тел./факс: 8(499)507-82-12

Для заметок

Для заметок