

Лабораторная работа № 1-08

ТЕПЛОЁМКОСТЬ ГАЗОВ

1. Цель работы

Определение молярной теплоёмкости воздуха при постоянном объёме C_v и при постоянном давлении C_p .

2. Теоретическое введение

Молярной теплоёмкостью C вещества называется величина, равная количеству теплоты, которое нужно сообщить одному молю вещества, чтобы повысить его температуру на один кельвин.

Для определения теплоёмкости используем первое начало термодинамики: количество теплоты (δQ), сообщённое системе, идёт на приращение внутренней энергии (dU) системы и на совершение системой работы (δA) над внешними телами. Для газа, объём (V) которого изменяется при постоянном давлении (p) можно принять $\delta A = p dV$ и первое начало термодинамики принимает вид:

$$\delta Q = dU + p dV. \quad (1)$$

В формуле (1) dU есть полный дифференциал. Внутренняя энергия представляет собой функцию состояния системы. Её приращение при переходе системы из одного состояния в другое **не зависит от пути**, по которому совершается переход, то есть

$\Delta U = U_2 - U_1 = \int_1^2 dU$, и равно разности значений функции U в состояниях 2 и 1. В формуле

(1) для Q и A применены обозначения δQ и δA , так как эти величины не являются

полными дифференциалами, то есть интегралы $\int_1^2 \delta A = A_{12}$ и $\int_1^2 \delta Q = Q_{12}$ **зависят от пути**,

по которому производится интегрирование (они являются функциями процесса) и не могут быть представлены в виде $A_2 - A_1$ и $Q_2 - Q_1$. Поскольку о запасе работы и теплоты говорить нельзя, то эти величины не являются функциями состояния. A_{12} – работа, совершаемая телом в ходе определённого процесса 1 – 2, а Q_{12} – количество теплоты, полученное телом в ходе того же процесса.

Введя обозначения, что масса газа m с молярной массой M содержит $\nu = m/M$ число молей, молярную теплоёмкость C можно записать как

$$C = \frac{1}{\nu} \frac{dQ}{dT}. \quad (2)$$

В зависимости от условий, при которых происходит нагревание вещества, различают молярную теплоёмкость при постоянном объёме C_v и при постоянном давлении C_p . Из (1) и (2) при изохорических условиях ($V = \text{const}$) получаем

$$C_v = \frac{1}{\nu} \frac{dU}{dT}, \quad (3)$$

при изобарических условиях ($p = \text{const}$) теплоёмкость определяется как

$$C_p = \frac{1}{\nu} \left(\frac{dU}{dT} + p \frac{dV}{dT} \right). \quad (4)$$

Учитывая уравнение состояния для идеального газа:

$$pV = \nu RT, \quad (5)$$

можно получить уравнение Майера:

$$C_p - C_v = R, \quad (6)$$

где $R = 8,31 \text{ Дж}/(\text{К} \cdot \text{моль})$ – молярная газовая постоянная.

Внутренняя энергия в (3) может быть вычислена в рамках кинетической теории газа:

$$U = \nu(i/2)kN_A T, \quad (7)$$

где k – постоянная Больцмана, N_A – число Авогадро, i – число степеней свободы молекулы: поступательных, вращательных и колебательных. Для молекул с жёсткой связью между атомами учитываются только поступательные и вращательные степени свободы. Молекулы в трёхмерном пространстве (x, y, z) имеют три поступательные степени свободы. Двухатомные молекулы имеют две дополнительные вращательные степени свободы вокруг главных осей инерции. Трёхатомные (и более) молекулы имеют три вращательные степени свободы. Одноатомные частицы не имеют вращательных степеней свободы. Так как по определению

$$R = kN_A, \quad (8)$$

то после подстановки получим

$$C_v = (i/2)R. \quad (9)$$

С учётом равенства (6), получим

$$C_p = \left(\frac{i+2}{2} \right) R. \quad (10)$$

Воздух состоит, в основном, из кислорода и азота (примерно 20% и 80%, соответственно). Как первое приближение, можно принять для воздуха $i = 5$ и тогда

$$C_v = 2,5R = 20,8 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К}); C_p = 3,5R = 29,1 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К}). \quad (11)$$

Определение C_p

Энергия δQ сообщается газу в данной работе электрическим нагревателем

$$\delta Q = U \cdot I \cdot \Delta t, \quad (12)$$

где U – напряжение на нагревателе, I – ток через нагреватель, Δt – время протекания тока через нагреватель. При $p = \text{const}$ увеличение температуры газа ΔT приводит к увеличению объёма ΔV . Из уравнения состояния идеального газа следует, что

$$\Delta V = \frac{\nu R}{p} \Delta T = \frac{V}{T} \Delta T. \quad (13)$$

Учитывая формулы (2), а также (12) и (13), получим

$$C_p = \frac{1}{\nu} \cdot \frac{U \cdot I \cdot \Delta t \cdot V}{\Delta V \cdot T}. \quad (14)$$

Подставив в (14) число молей ν из уравнения (5): $\nu = pV/RT$, получим

$$C_p = R \cdot \frac{U \cdot I}{p} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta V}, \quad (15)$$

Здесь давление p немного отличается от атмосферного давления p_a с учётом поправки используемой методики измерений $p_n = 14,8$ ГПа (см. ниже в описании установки):

$$p = p_a - p_n. \quad (16)$$

Определение C_v

При изохорических условиях увеличение температуры ΔT приводит к увеличению давления Δp :

$$\Delta p = \frac{\nu R \Delta T}{V} = \frac{p}{T} \Delta T. \quad (17)$$

Подставляя ΔT в (3) и учитывая (12), получим

$$C_v = \frac{1}{\nu} \cdot \frac{U \cdot I \cdot \Delta t \cdot p}{\Delta p \cdot T}. \quad (18)$$

Подставив в (18) число молей ν из уравнения (5): $\nu = pV/RT$, получим

$$C_v = R \cdot \frac{U \cdot I}{V} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta p}. \quad (19)$$

Измерения давления в используемом ниже методе приводят к небольшому изменению объёма, которое должно быть на практике учтено в вычислениях:

$$\Delta T = \frac{p}{\nu R} \Delta V + \frac{V}{\nu R} \Delta p = \frac{T}{pV} (p \Delta V + V \Delta p). \quad (20)$$

Из уравнений (3) и (1) следует, что

$$C_v = \frac{1}{\nu} \cdot \frac{\delta Q - p\Delta V}{\Delta T}. \quad (21)$$

Подставив в это уравнение (20) и (12), получаем:

$$C_v = \frac{pV}{\nu T} \cdot \frac{U \cdot I \cdot \Delta t - p\Delta V}{p\Delta V + V\Delta p}. \quad (22)$$

В данной работе принимается

$$\Delta V = a \cdot \Delta p, \quad (23)$$

где $a = 0,855 \text{ см}^3/\text{гПа}$ – постоянная методики (см. ниже в описании установки).

Подставив в (22) $\Delta V = a \cdot \Delta p$ и число молей ν из уравнения (5) $\nu = pV/RT$, получим

$$C_v = R \left(\frac{U \cdot I \cdot \Delta t}{(ap + V) \cdot \Delta p} - \frac{ap}{ap + V} \right). \quad (24)$$

Здесь p – атмосферное давление (без поправки, в отличие от формулы (15)).

3. Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка показана на рис.1.а для измерения C_v и на рис.1.б для измерения C_p . Тепло сообщается газу, находящемуся в стеклянном сосуде (1), электрическим нагревателем (2), включаемым на короткое время. Увеличение температуры газа при изохорических условиях приводит к росту давления, которое измеряется манометром (3). При изобарических условиях увеличение температуры приводит к увеличению объёма газа, которое определяется с помощью газового шприца (4) с поршнем. Молярная теплоёмкость C_v и C_p вычисляется по изменению давления и объёма, соответственно. Отверстие в нижней части сосуда на рис 1.а и 1.б закрыто резиновой пробкой (5), через которую проходят электроды нагревателя (6) и одноходовой кран. Провода (7) соединяют нагреватель с источником питания на выходе измерительного прибора (8), который определяет время нагрева газа (четыре значащие цифры). В горловину сосуда вставлена резиновая пробка (9) с трёхходовым краном (10). Дополнительный газовый шприц (11) используется при повторных измерениях C_p . Для измерения давления окружающей среды к установке прилагается стандартный цифровой барометр (не показан на рисунке). Напряжение и ток через нагреватель определяются цифровым вольтметром (12) и цифровым амперметром (13).

Электрическая схема включения измерительного прибора, вольтметра, амперметра и нагревателя показана на рис. 2.

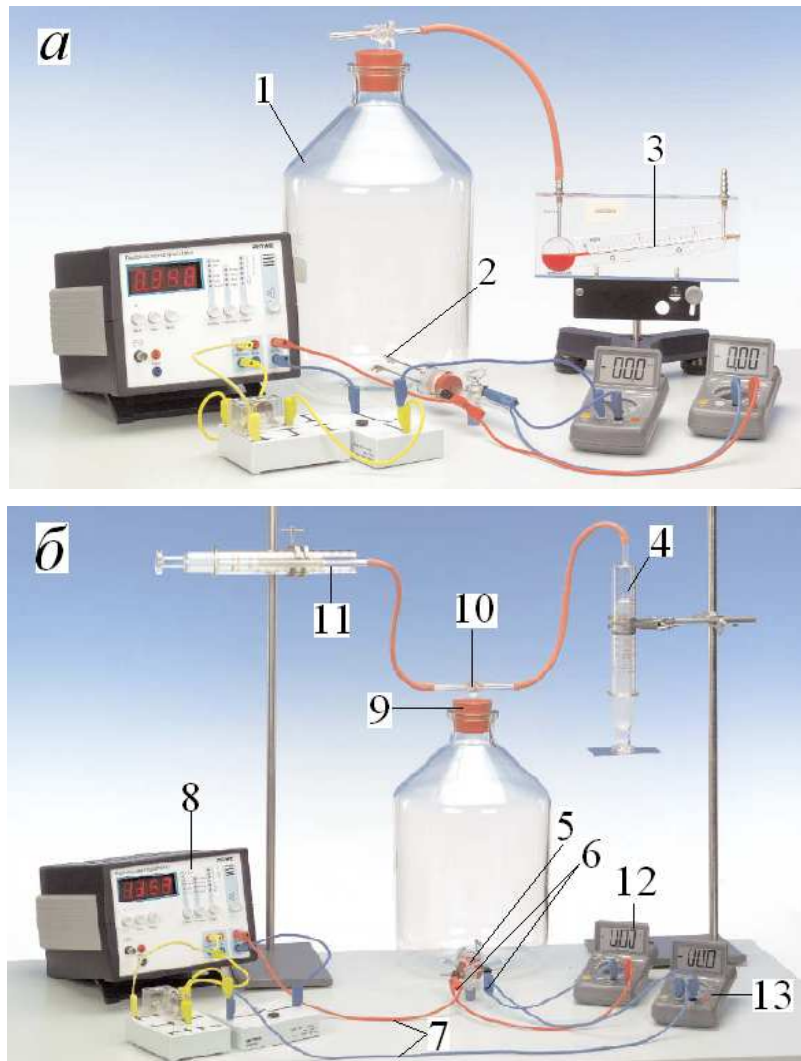


Рис. 1. *а* – установка для измерения C_v ; *б* – установка для измерения C_p .

1- стеклянный сосуд; 2 – электрический нагреватель; 3 – манометр; 4 – вертикальный газовый шприц с поршнем; 5 – резиновая пробка; 6 - электроды нагревателя; 7 - провода; 8 – измерительный прибор; 9 - резиновая пробка; 10 - трёхходовой кран; 11 – горизонтальный газовый шприц; 12 - цифровой вольтметр; 13 - цифровой амперметр.

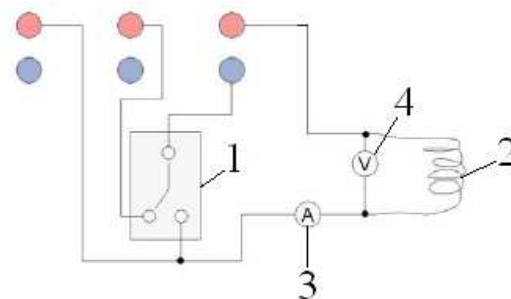


Рис. 2. Электрическая схема включения измерительного прибора (1), нагревателя (2), амперметра (3) и вольтметра (4).

При определении C_p по формуле (15) используется давление p немного отличающегося от атмосферного давления p_a с учётом поправки на используемую методику измерений $p_n = 14,8$ гПа: $p = p_a - p_n$ (см.(16)). Здесь $p_n = 14,8$ гПа – это давление поршня в газовом шприце (4) на рис. 1.б. Поправка давления из-за поршня вычисляется как: $p_n = m_n g / S_n$. Здесь масса поршня $m_n = 0,1139$ кг, $g = 9,81$ м/с², площадь поршня $S_n = 7,55 \cdot 10^{-4}$ м².

При определении C_V по формуле (24) используется постоянная методики a , которая вычисляется следующим способом. Индикаторная трубка в манометре (3) на рис. 1.а имеет радиус $r = 2$ мм. Её длина изменяется на 1 см при изменении давления на величину $p = 0,147$ гПа. Поэтому соответствующее изменение объёма можно записать как $\Delta V = a \cdot \Delta p$, где $a = \pi \cdot r^2 \cdot (1/0,147)$ см³/гПа = 0,855 см³/гПа.

Таблица 1. Технические данные приборов.

№№ п/п	Название прибора	Пределы измерений	Число делений	Цена деления	Класс точности	Абсолютная приборная погрешность
1	Измерительный прибор					
2	Манометр					
3	Газовый шприц					
4	Цифровой барометр					
5	Цифровой вольтметр					
6	Цифровой амперметр					

4. Порядок выполнения работы

При выполнении работы необходимо строго соблюдать правила техники безопасности, установленные на рабочем месте в лаборатории. Работу следует делать в строгом соответствии с нижеизложенным порядком выполнения и в объёме, предусмотренном в индивидуальном задании. Поскольку электрический ток через контакты к нагревателю может нанести электрические травмы и вызвать порчу лабораторного оборудования, необходимо каждый раз перед запуском измерений убедиться в отсутствии условий для короткого замыкания и надёжной электрической изоляции электроконтактов.

4.1. Измерение C_v .

4.1.1. Подсоедините манометр (3) к трёхходовому крану (10) с помощью резиновой трубки (рис. 1.а). Манометр должен быть расположен горизонтально.

4.1.2. Подсоедините провода для измерения тока и напряжения к измерительному прибору, амперметру и вольтметру по схеме на рис. 2 .

4.1.3. Поверните трёхходовой кран (10) в позицию, при которой сосуд соединён с манометром, но они перекрыты от окружающей атмосферы.

4.1.4. Измерение начинается при нажатии кнопки включения тока через нагреватель. Время измерения Δt должно быть не более 1 секунды. Запишите в таблицу 2 значение тока и напряжения. Сразу же после выключения тока через нагреватель определите увеличение давления Δp на манометре. Время нагрева Δt , показываемое измерительным прибором, и увеличение давления Δp запишите в таблицу 2.

4.1.5. Проведите 10 таких опытов. После каждого из 10 измерений проводите выравнивание давления в сосуде и манометре с давлением окружающей атмосферы, открывая трёхходовой кран для атмосферы. Ток нагрева надо выбирать таким ($\approx 0,5$ А), чтобы за время нагрева давление в сосуде увеличилось не более чем 1 гПа.

Таблица 2. Измерения C_v .

№№ п/п, i	$(\Delta t)_i$, с	$(\Delta p)_i$, гПа	U , В	I , А	p , гПа (атмосферное)
1					
2					
...					

4.2. Измерение C_p .

4.2.1. Замените манометр (3) двумя газовыми шприцами (4, 11), которые подсоединяются к сосуду через трёхходовой кран (10), как показано на рис. 1.б.

4.2.2. Поверните трёхходовой кран (10) в позицию, при которой сосуд сообщается только с вертикальным газовым шприцем.

4.2.3. Подсоедините провода для измерения тока и напряжения к измерительному прибору, амперметру и вольтметру по схеме на рис. 2 .

4.2.4. До включения тока через нагреватель слегка вращайте рукой поршень вертикального шприца для уменьшения трения между поршнем и стенками шприца.

4.2.5. Продолжая вращать рукой поршень, начните измерение нажатием кнопки включения тока через нагреватель. Время измерения Δt должно быть не более 1 секунды. Запишите в табл. 3 значение тока и напряжения. Сразу же после выключения тока через нагреватель определите увеличение объёма ΔV по смещению поршня в вертикальном газовом шприце. Время нагрева Δt , показываемое измерительным прибором, и увеличение объёма ΔV запишите в таблицу 3. Дополнительно запишите в таблицу 3 атмосферное давление по показаниям цифрового манометра.

4.2.7. Проведите 10 таких опытов. После каждого измерения удаляйте воздух из системы до тех пор, пока вертикальный шприц не покажет исходный объём. Для этого поверните трёхходовой кран (10) в положение, при котором оба шприца и сосуд соединены друг с другом.

Таблица 3. Измерения C_p .

№№ п/п, i	$(\Delta t)_i$, с	$(\Delta V)_i$, м ³	U , В	I , А	p_a , гПа (атмосферное)
1					
2					
...					

5. Обработка результатов измерений

5.1. Данные для C_v

5.1.1. По результатам в табл. 2 прямых измерений изменений давления $(\Delta p)_i$ при нагреве найдите их среднее значение $\langle (\Delta p)_i \rangle$, ошибки отдельных измерений $\Delta(\Delta p)_i$ и среднеквадратичную ошибку по формулам:

$$\langle (\Delta p)_i \rangle = \frac{\sum_{i=1}^f (\Delta p)_i}{f}, \quad \Delta(\Delta p)_i = \langle (\Delta p)_i \rangle - (\Delta p)_i, \quad \sigma_{\Delta p} = \sqrt{\sum_{i=1}^f \frac{(\Delta(\Delta p)_i)^2}{f(f-1)}}, \text{ где } f - \text{ число}$$

опытов по измерению $(\Delta p)_i$.

Полная абсолютная ошибка изменения давления $\Delta(\Delta p)$ определяется как

$$\Delta(\Delta p) = \sigma_{\Delta p} + \delta_{\text{пр}},$$

где $\delta_{\text{пр}}$ – приборная ошибка манометра.

Полученное значение $\Delta(\Delta p)$ округлите до одной значащей цифры. Округлите значения

$(\Delta p)_i$, $\langle(\Delta p)_i\rangle$ с точностью до ошибки (три значащие цифры). Найдите относительную ошибку $\varepsilon_{\Delta p}$ измерений изменения давления при нагревах по формуле:

$$\varepsilon_{\Delta p} = \frac{\Delta(\Delta p)}{\langle(\Delta p)_i\rangle} \cdot 100\%.$$

Результаты вычислений $(\Delta p)_i$, $\langle(\Delta p)_i\rangle$, $\Delta(\Delta p)_i$, $\sigma_{\Delta p}$, $\Delta(\Delta p)$ и $\varepsilon_{\Delta p}$ запишите в таблицу 4.

Таблица 4. Оценка ошибок измерений изменения давления при нагревах.

№ п/п, i	$(\Delta p)_i$, гПа	$\langle(\Delta p)_i\rangle$, гПа	$\Delta(\Delta p)_i$, гПа	$\sigma_{\Delta p}$, гПа	$\Delta(\Delta p)$, гПа	$\varepsilon_{\Delta p}$, %
1						
2						
...						

5.1.2. По результатам измерений в табл. 2 рассчитайте величины $(C_V)_i$ по формуле (24), где ёмкость сосуда $V = 10$ литров, p – атмосферное давление во время опыта.

5.1.3. Вычислите среднее значение $\langle C_V \rangle$: $\langle C_V \rangle = \frac{\sum_{i=1}^f (C_V)_i}{f}$, где f – число опытов по измерению C_V . Результаты вычислений $(C_V)_i$ и $\langle C_V \rangle$ запишите в таблицу 5.

5.1.4. Ошибка определения C_V определяется по правилам косвенных измерений.

Следовательно, относительная ошибка $\varepsilon(C_V)$ определяется с учётом формулы (19) как $\varepsilon(C_V) = \Delta C_V / C_V \approx d \ln C_V = d \ln (R \cdot U \cdot I \cdot \Delta t / V \cdot \Delta p) \approx \Delta U / \langle U \rangle + \Delta I / \langle I \rangle + \Delta t / \langle t \rangle + \Delta V / \langle V \rangle + \Delta(\Delta p) / \langle(\Delta p)_i\rangle$.

Здесь ΔV – ошибка в определении объёма стеклянного сосуда, для которого $V = 10$ л.

Абсолютная ошибка ΔC_V вычисляется как

$$\Delta C_V = \varepsilon(C_V) \cdot \langle C_V \rangle.$$

Полученное значение ΔC_V округлите до одной значащей цифры. Результаты ΔC_V и $\varepsilon(C_V)$ (переведите ε в проценты) запишите в таблицу 5.

Таблица 5. Оценка ошибок измерения C_V .

№ п/п, i	$(C_V)_i$, Дж/(моль·К)	$\langle C_V \rangle$, Дж/(моль·К)	$\varepsilon(C_V)$, %	ΔC_V , Дж/(моль·К)
1				
2				
...				

5.2. Данные для C_p

5.2.1. По результатам в табл. 3 прямых измерений изменений объёма $(\Delta V)_i$ при нагреве найдите их среднее значение $\langle(\Delta V)_i\rangle$, ошибки отдельных измерений $\Delta(\Delta V)_i$ и среднеквадратичную ошибку по формулам:

$$\langle(\Delta V)_i\rangle = \frac{\sum_{i=1}^f (\Delta V)_i}{f}, \quad \Delta(\Delta V)_i = \langle(\Delta V)_i\rangle - (\Delta V)_i, \quad \sigma_{\Delta V} = \sqrt{\sum_{i=1}^f \frac{(\Delta(\Delta V)_i)^2}{f(f-1)}}, \quad \text{где } f - \text{ число}$$

опытов по измерению $(\Delta V)_i$.

Полная абсолютная ошибка изменения объёма $\Delta(\Delta V)$ определяется как

$$\Delta(\Delta V) = \sigma_{\Delta V} + \delta_{\text{пр}},$$

где $\delta_{\text{пр}}$ – приборная ошибка газового шприца.

Полученное значение $\Delta(\Delta V)$ округлите до одной значащей цифры. Округлите значения $(\Delta V)_i$, $\langle(\Delta V)_i\rangle$ с точностью до ошибки (три значащие цифры). Найдите относительную ошибку $\varepsilon_{\Delta V}$ измерений изменения объёма при нагревах по формуле:

$$\varepsilon_{\Delta V} = \frac{\Delta(\Delta V)}{\langle(\Delta V)_i\rangle} \cdot 100\%.$$

Результаты вычислений $(\Delta V)_i$, $\langle(\Delta V)_i\rangle$, $\Delta(\Delta V)_i$, $\sigma_{\Delta V}$, $\Delta(\Delta V)$ и $\varepsilon_{\Delta V}$ запишите в таблицу 6.

Таблица 6. Оценка ошибок измерений изменения объёма при нагревах.

№ п/п, i	$(\Delta V)_i, \text{ м}^3$	$\langle(\Delta V)_i\rangle, \text{ м}^3$	$\Delta(\Delta V)_i, \text{ м}^3$	$\sigma_{\Delta V}, \text{ м}^3$	$\Delta(\Delta V), \text{ м}^3$	$\varepsilon_{\Delta V}, \%$
1						
2						
...						

5.2.2. По результатам измерений в табл. 3 рассчитайте величины $(C_p)_i$ по формуле (15).

5.2.3. Вычислите среднее значение $\langle C_p \rangle$: $\langle C_p \rangle = \frac{\sum_{i=1}^f (C_p)_i}{f}$, где f – число опытов по

измерению C_p . Результаты вычислений $(C_p)_i$ и $\langle C_p \rangle$ запишите в таблицу 7.

5.2.4. Ошибка определения C_p определяется по правилам косвенных измерений.

Следовательно, относительная ошибка $\varepsilon(C_p)$ определяется с учётом формулы (15) как $\varepsilon(C_p) = \Delta C_p / C_p \approx d \ln C_p = d \ln (R \cdot U \cdot T \cdot \Delta t / p \cdot \Delta V) \approx \Delta U / \langle U \rangle + \Delta I / \langle I \rangle + \Delta t / \langle t \rangle + \Delta p / \langle p \rangle + \Delta(\Delta V) / \langle(\Delta V)_i\rangle$.

Здесь Δp – это ошибка в определении атмосферного давления

Абсолютная ошибка ΔC_p вычисляется как

$$\Delta C_p = \varepsilon(C_p) \cdot \langle C_p \rangle.$$

Полученное значение ΔC_p округлите до одной значащей цифры. Результаты ΔC_p и $\varepsilon(C_p)$ (переведите ε в проценты) запишите в таблицу 7.

Таблица 7. Оценка ошибок измерения C_p .

№ п/п, i	$(C_p)_i$, Дж/(моль К)	$\langle C_p \rangle$, Дж/(моль К)	$\varepsilon(C_p)$, %	ΔC_p , Дж/(моль К)
1				
2				
...				

6. Библиографический список

а) основная:

1. Савельев И.В. Курс физики. Т.1. СПб.: Лань. 2007. с.231-238, 245-249.
2. Физика. Раздел: Молекулярная физика и термодинамика. Лабораторный практикум. М.: МИСиС. «Учёба». 2008.
3. Батулин Б.Н. Правила электробезопасности при выполнении лабораторных работ. Учебное пособие. М.: МИСиС. 1995. -38 с.

б) дополнительная:

4. Савельев И.В. Курс общей физики. Кн. 3. М.: АСТ: Астрель. 2005. с.14-29, 56-64.
5. Иродов И.Е. Физика макросистем. Основные законы. М.: Физматлит. 2001. с. 11-17, 25-28.
6. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т. 2. М.: Физматлит. 2005. с. 43-60, 65-67, 212-215.

7. Индивидуальные задания

Задание 1.

1. Выведите формулу для молярной теплоёмкости идеального газа C_V при изохорических условиях через степени свободы. Рассчитайте C_V воздуха.
2. Проведите измерения C_V воздуха. Заполните табл. 2. Рассчитайте C_V воздуха из экспериментальных данных.
3. Сделайте оценки ошибок измерений. Заполните табл. 4 и табл. 5. Сравните экспериментальные данные с теорией и объясните возникшее различие этих значений.

Задание 2.

1. Выведите формулу для молярной теплоёмкости идеального газа C_p при изобарических условиях через степени свободы. Рассчитайте C_p воздуха.
2. Проведите измерения C_p воздуха. Заполните табл. 3. Рассчитайте C_p воздуха из экспериментальных данных.
3. Сделайте оценки ошибок измерений. Заполните табл. 6 и табл. 7. Сравните экспериментальные данные с теорией и объясните возникшее различие этих значений.

Задание 3.

1. Вычислите молярную теплоёмкость C_V для одноатомного, двухатомного и трёхатомного идеального газа.
2. Проведите измерения C_V воздуха. Заполните табл. 2. Рассчитайте C_V воздуха из экспериментальных данных.
3. Сделайте оценки ошибок измерений. Заполните табл. 4 и табл. 5. Сформулируйте закон равнораспределения энергии по степеням свободы идеального газа.

Задание 4.

1. Вычислите молярную теплоёмкость C_p для одноатомного, двухатомного и трёхатомного идеального газа.
2. Проведите измерения C_p воздуха. Заполните табл. 3. Рассчитайте C_p воздуха из экспериментальных данных.
3. Сделайте оценки ошибок измерений. Заполните табл. 6 и табл. 7. Сформулируйте первое начало термодинамики. Запишите уравнение состояния для n молей идеального газа.