



**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И
НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**
Федеральное государственное
автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Южный федеральный университет»
Инженерно-технологическая академия

**Руководство
к лабораторной работе №202**

КАФЕДРА ФИЗИКИ

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ МОЛЯРНЫХ
ТЕПЛОЕМКОСТЕЙ ВОЗДУХА В ПРОЦЕССАХ
ПРИ ПОСТОЯННОМ ДАВЛЕНИИ И
ПРИ ПОСТОЯННОМ ОБЪЕМЕ
МЕТОДОМ КЛЕМАНА И ДЕЗОРМА**

Для студентов всех технических направлений
и всех форм обучения

ИНЭП

УДК 536-34(076.5)

Составитель: Г.В. Арзуманян.

Руководство к лабораторной работе №202 «Определение отношения молярных теплоемкостей воздуха в процессах при постоянном давлении и при постоянном объеме методом Клемана и Дезорма». – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2015. – 27 с.

В пособии кратко рассмотрены теоретические положения, необходимые для выполнения лабораторной работы, подробно изложена методика эксперимента, описан порядок выполнения лабораторной работы и обработки результатов прямых измерений, а также приведён список вопросов для допуска к выполнению и защите лабораторной работы, содержание и правила оформления отчета по лабораторной работе. Пособие предназначено для студентов всех форм обучения и всех специальностей, в учебные планы которых включена дисциплина «Физика».

Табл. 5. Ил. 6. Библиогр.: 4 назв.

Рецензент Погорелов Е.Н., кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник кафедры САУ.

1. РАВНОВЕСНЫЙ АДИАБАТИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС. ТЕПЛОЕМКОСТЬ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА

Адиабатическим процессом называется процесс, при котором система не обменивается теплотой с внешней средой. Первый закон термодинамики для бесконечно малого адиабатического изменения состояния системы, имеет вид

$$\delta Q = dU + \delta A = dU - \delta A' = 0, \quad (1)$$

где δQ – элементарное количество теплоты, полученное системой от внешних систем; dU – элементарное приращение внутренней энергии рассматриваемой системы; δA – элементарная работа по изменению объёма рассматриваемой системы; $\delta A' = -\delta A$ – работа внешних систем над рассматриваемой системой.

В дальнейшем мы будем рассматривать идеальный газ (ИГ), являющийся самой простой моделью реального газа. В термодинамике под ИГ понимают газ, подчиняющийся уравнению состояния Клапейрона – Менделеева:

$$pV = \frac{m}{\mu} RT = \nu RT, \quad (2)$$

где p – давление газа; V – объём газа; m – масса газа; μ – молярная масса газа; $R = 8,31$ Дж/(моль·К) – универсальная газовая постоянная; T – термодинамическая температура; ν – количество вещества.

Уравнение равновесного адиабатического процесса в ИГ описывается уравнением адиабаты (уравнение Пуассона)

$$pV^\gamma = const, \quad (3)$$

где γ – показатель адиабаты (коэффициент Пуассона), равный отношению теплоемкости ИГ при изобарическом процессе к его теплоемкости при изохорическом процессе.

График адиабатического процесса в координатах (p , V) схематически представлен на рис. 1. Для сравнения на этом же рисунке представлены изотерма ($T = const$), изохора ($V = const$) и изобара ($p = const$) ИГ.

Из уравнения (3) можно получить уравнение адиабаты в переменных (p , T). Для этого выразим из уравнения Клапейрона –

Менделеева (2) объём V через p и T : $V = \frac{m RT}{\mu p}$. Подставив это

выражение в (3) и учтя, что m , μ и R – постоянные, получим: $T^\gamma p^{(1-\gamma)} = const$. Действуя аналогично, можно вывести уравнение адиабаты в переменных (T, V) : $TV^{(\gamma-1)} = const$.

Теплоёмкостью термодинамической системы (ТС) (тела) называют отношение количества теплоты δQ , полученного системой (телом) при бесконечно малом изменении его состояния, к связанному с этим изменением температуры dT :

$$C = \frac{\delta Q}{dT}, [C] = \frac{\text{Дж}}{\text{К}}. \quad (4)$$

Удельной теплоёмкостью тела (ТС) называют величину, определяемую как

$$c = \frac{1}{m} \frac{\delta Q}{dT} = \frac{C}{m}, [c] = \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}, \quad (5)$$

где m – масса системы (тела).

Молярная теплоёмкость тела (ТС):

$$C_\mu = \frac{1}{\nu} \frac{\delta Q}{dT} = \frac{C}{\nu}, [C_\mu] = \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}, \quad (6)$$

где ν – количество вещества в системе.

Величина теплоемкости ТС (тела) зависит от условий, при которых происходит передача системе количества теплоты, а также от температуры системы. Особый интерес представляет теплоемкость ИГ для случаев, когда её нагревание происходит при постоянном давлении (теплоёмкость в этом случае обозначается через C_p) и при постоянном объёме (теплоёмкость в этом случае обозначается через C_V).

При равновесном изобарическом ($\nu = const, p = const$) изменении температуры ИГ, всё подведенное к газу тепло δQ_p затрачивается на изменение его внутренней энергии dU и на совершение элементарной работы δA против внешних сил:

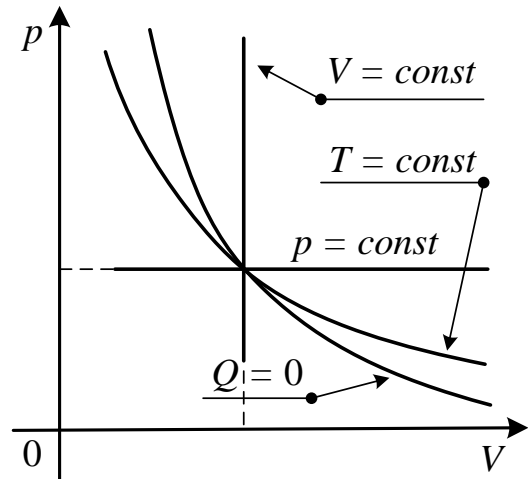


Рис. 1

$$\delta Q_p = dU + \delta A . \quad (7)$$

Приращение внутренней энергии ИГ равно

$$dU = \frac{i}{2} \frac{m}{\mu} R dT = \frac{i}{2} \nu R dT , \quad (8)$$

где i – число степеней свободы молекулы газа; dT – изменение температуры газа.

Элементарная работа газа при изменении его объёма на dV равна

$$\delta A = p dV .$$

Дифференцируя уравнение (2) и учитывая, что при равновесном изобарическом процессе $dp = 0$, находим

$$d(pV) = p dV + V dp = p dV = \delta A = \nu R dT . \quad (9)$$

Подставив выражения (8) и (9) в (7), получаем

$$\delta Q_p = \left(\frac{i}{2} + 1 \right) \frac{m}{\mu} R dT . \quad (10)$$

Из формул (4), (5) и (6) с учетом (10) получаем следующие выражения для теплоемкости ИГ при постоянном давлении:

$$\text{– теплоёмкость: } C_p = \left(\frac{i}{2} + 1 \right) \frac{m}{\mu} R ; \quad (11)$$

$$\text{– удельная теплоёмкость: } c_p = \left(\frac{i}{2} + 1 \right) \frac{R}{\mu} ; \quad (11^*)$$

$$\text{– молярная теплоёмкость: } C_{\mu p} = \left(\frac{i}{2} + 1 \right) R . \quad (11^{**})$$

При изохорном процессе ($\nu = const, V = const$) $dV = 0$. Следовательно, и работа газа $\delta A = p dV$ равна нулю. Таким образом, все подведенное к газу тепло δQ_V идет на приращение его внутренней энергии:

$$\delta Q_V = dU = \frac{i}{2} \frac{m}{\mu} R dT = \frac{i}{2} \nu R dT . \quad (12)$$

Из формул (4), (5) и (6) с учетом (12) получаем следующие выражения для теплоемкостей ИГ при постоянном объёме:

$$\text{– теплоёмкость: } C_V = \frac{i}{2} \frac{m}{\mu} R ; \quad (13)$$

$$\text{– удельная теплоёмкость: } c_V = \frac{i}{2} \frac{R}{\mu} ; \quad (13^*)$$

– молярная теплоёмкость: $C_{\mu V} = \frac{i}{2}R$. (13^{**})

Таким образом, молярная теплоёмкость ИГ при изобарическом и изохорическом процессах не зависит от температуры и других параметров состояния газа, а определяется только лишь числом степеней свободы i молекул газа.

Из формул (11^{**}) и (13^{**}) получаем соотношение, связывающее молярные теплоёмкости ИГ при изохорическом и изобарическом процессах (соотношение Майера):

$$C_{\mu p} - C_{\mu V} = R.$$

Из формул (11) и (13) получаем соотношение для показателя адиабаты γ (см. формулу (3)):

$$\gamma = \frac{C_{\mu p}}{C_{\mu V}} = \frac{C_p}{C_V} = \frac{c_p}{c_V} = \frac{i+2}{i} > 1. \quad (14)$$

Согласно (14), числовое значение γ определяется только числом степеней свободы молекулы (структурой молекулы), т.е. количеством независимых координат, определяющих положение молекулы в пространстве.

Известно, что масса атома практически полностью сосредоточена в его ядре, размеры которого очень малы. Поэтому при определении числа степеней свободы произвольной молекулы атомы в ней можно рассматривать как материальные точки.

Положение в пространстве одноатомной молекулы определяется заданием лишь трех пространственных координат (например, декартовых: x, y, z). Поэтому такая молекула имеет лишь три степени свободы. Поскольку изменение положения одноатомной молекулы обусловлено только ее поступательным движением, соответствующие степени свободы называют поступательными ($i_{\text{пост}} = 3$).

Двухатомная молекула газа в первом приближении представляет собой два жестко связанных атома, находящихся на некотором расстоянии друг от друга (рис. 2). Эта система уже имеет пять степеней свободы. Три из них являются поступательными и определяют координаты центра масс системы ($i_{\text{пост}} = 3$). Две степени свободы определяют возможные вращательные движения молекулы вокруг взаимно перпендикулярных осей $O_1O'_1$ и $O_2O'_2$, каждая из которых перпендикулярна оси молекулы $O_3O'_3$ (рис 2). Эти степени

свободы называются вращательными ($i_{\text{вращ}} = 2$).

Таким образом, для двухатомной молекулы

$$i = i_{\text{пост}} + i_{\text{вращ}} = 3 + 2 = 5.$$

Молекулы трех- и многоатомных газов (рис. 3), обычно также представляют в виде системы жестко связанных атомов. Следовательно, эти молекулы имеют шесть степеней свободы: три поступательные и три вращательные.

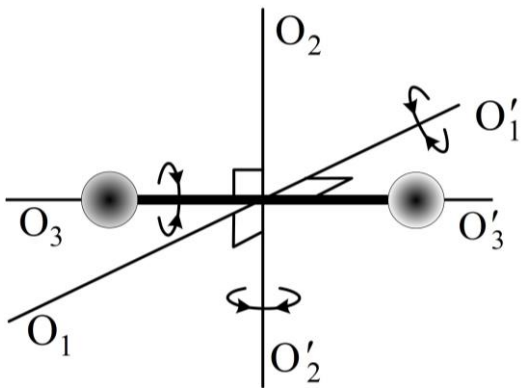


Рис. 2

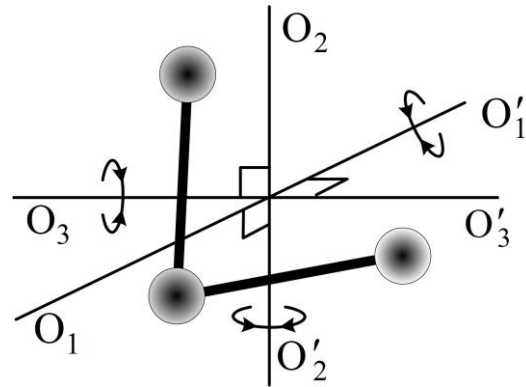


Рис. 3

В табл. 1 приведены значения числа степеней свободы различных молекул и значения (согласно (11^{**}) и (13^{**})) молярных теплоемкостей соответствующего однокомпонентного идеального газа.

Таблица 1

Молекула	Число степеней свободы		i	$C_{\mu V}$	$C_{\mu p}$	γ
	$i_{\text{пост}}$	$i_{\text{вращ}}$				
Одноатомная	3	–	3	$3/2R$	$5/2R$	1,67
Двухатомная	3	2	5	$5/2R$	$7/2R$	1,40
С числом атомов три и более	3	3	6	$6/2R$	$8/2R$	1,33

Для смеси газов расчет осложняется тем, что нужно знать процентное содержание каждого газа в смеси. В частности, атмосферный воздух представляет собой смесь различных газов, концентрация которых зависит от региона, времени года, высоты над уровнем моря и т.д. В курсе общей физики во многих случаях

атмосферный воздух считается двухатомным газом, так как в нём преобладают азот N_2 (78 %) и кислород O_2 (21 %). Следовательно, для него число степеней свободы можно взять равным пяти ($i = 5$).

В табл. 2 приведены экспериментально определённые значения показателей адиабаты для различных газов при различных температурах.

Таблица 2

Газ	$t, ^\circ C$	γ	Газ	$t, ^\circ C$	γ
Сухой воздух	20	1,400	CO_2	20	1,300
	100	1,401		100	1,281
H_2	20	1,410	O_2	20	1,400
	100	1,404		100	1,399
H_2O	20	1,330	N_2	-181	1,470
	100	1,324		15	1,404

2. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 202

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ МОЛЯРНЫХ ТЕПЛОЕМКОСТЕЙ ВОЗДУХА В ПРОЦЕССАХ ПРИ ПОСТОЯННОМ ДАВЛЕНИИ И ПРИ ПОСТОЯННОМ ОБЪЕМЕ МЕТОДОМ КЛЕМАНА И ДЕЗОРМА

2.1. Цель работы

Изучение термодинамических процессов в газе и экспериментальное определение показателя адиабаты воздуха методом Клемана и Дезорма.

2.2. Разделы теории

Идеальный газ. Уравнение состояния. Изопроцессы в идеальном газе. Первый закон термодинамики. Адиабатический процесс. Применение первого закона термодинамики к изопроцессам в идеальном газе.

[1. С. 227–211, 222–250; 2. С. 81–88, 99–108; 3. С. 108–125, 144–147]

2.3. Приборы и принадлежности

Стеклянный баллон, *U*-образный водяной манометр, ручной насос (компрессор).

2.4. Задание для предварительной подготовки

1. Изучить настоящие методические указания и соответствующие разделы теории (см. п.2.2).

2. Подготовить ответы на контрольные вопросы.

3. Подготовить отчет по лабораторной работе в соответствии с требованиями, предъявляемыми к отчетам (см. далее разд. 3).

2.5. Задание на лабораторную работу

1. Провести измерения величин избыточного давления воздуха в баллоне в состоянии теплового равновесия с окружающей средой.

2. Результаты многократных прямых измерений обработать методом Стюдента.

3. Рассчитать среднее значение показателя адиабаты воздуха $\langle \gamma \rangle$ и оценить погрешность косвенных измерений.

4. Провести анализ полученного значения $\langle \gamma \rangle$, сравнив его со значением, рассчитанным по формуле (14), считая воздух двухатомным газом.

5. Сделать выводы по результатам выполнения работы.

2.6. Описание установки и вывод формулы для расчета отношения молярных теплоемкостей воздуха в процессах при постоянном давлении и постоянном объеме

Прежде чем рассмотреть схему экспериментальной установки и приступить к выводу рабочей формулы, рассмотрим два мысленных эксперимента.

Первый эксперимент. Изолированная система С состоит из систем А и В, которые не могут обмениваться друг с другом веществом (системы А и В закрытые) (рис. 4). Пусть системы А и В не могут обмениваться друг с другом энергией в форме работы (системы А и В механически не взаимодействуют друг с другом) и пусть в начальный момент времени давление и температура в системе А равны соответственно p_1 и T_1 , а в системе В – $p_2 \neq p_1$ и $T_2 \neq T_1$.

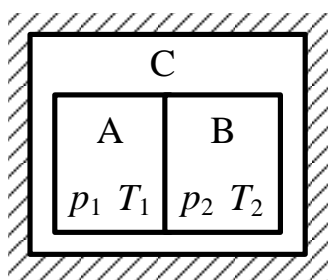


Рис. 4

По условию эксперимента, системы А и В не являются изолированными, так как могут обмениваться между собой теплом. В этом случае за счёт теплообмена через конечный промежуток времени $\Delta\tau_1$ температура в системах А и В станет одинаковой ($T'_1 = T'_2$) и теплообмен прекратится. Так как системы А и В механически не взаимодействуют друг с другом, то выравнивание температур в них, в общем случае, не приводит к выравниванию давлений, т.е. $p'_1 \neq p'_2$.

Таким образом, в этом эксперименте между системами А и В устанавливается только термическое (тепловое) равновесие.

Второй эксперимент. Изолированная система С состоит из двух теплоизолированных друг от друга, закрытых систем А и В, которые могут механически взаимодействовать друг с другом (рис. 4). Допустим, что в начальный момент времени давление и температура в системе А равны соответственно p_1 и T_1 , а в системе В – $p_2 \neq p_1$ и $T_2 \neq T_1$. Так как системы механически взаимодействуют друг с другом, то через конечный промежуток времени $\Delta\tau_2$ между ними устанавливается механическое равновесие (т.е. $p'_1 = p'_2$). По условию эксперимента, системы А и В теплоизолированные. Следовательно, в конечном состоянии температура в них, в общем случае, будет разной ($T'_1 \neq T'_2$).

Многочисленные эксперименты показали, что *длительность процессов установления теплового и механического равновесия между термодинамическими системами, происходящих в достаточно большом объеме газа, различна, а именно $\Delta\tau_1 \gg \Delta\tau_2$.*

На этом экспериментально установленном факте и основан метод определения показателя адиабаты воздуха, предложенный Николя Клеманом и Шарлем-Бенаром Дезормом в 1819 г.

Схема лабораторной установки приведена на рис. 5 и включает стеклянный баллон 1 объемом 19 литров, соединенный с открытым водяным U-манометром 4 и ручным насосом (компрессором) 2.

В лабораторной установке имеются также краны K_1 и K_2 . Напускной кран K_1 соединяет баллон с ручным насосом 2, предназначенным для нагнетания в баллон некоторого количества воздуха. Этот кран также позволяет устанавливать начальный уровень воды в коленах U-манометра после заполнения баллона воздухом.

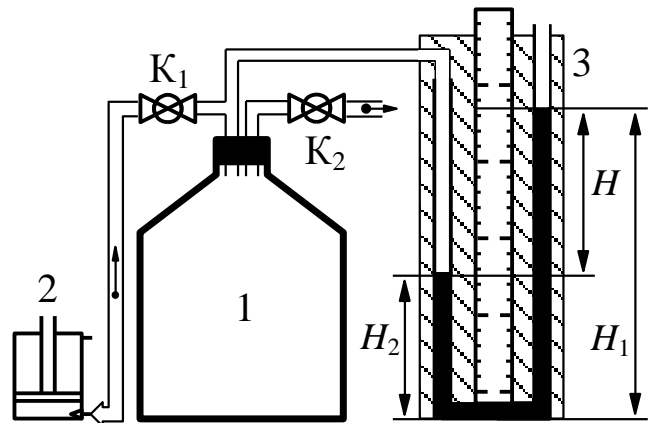


Рис. 5

Открытый водяной U-манометр 3 служит для измерения избыточного давления Δp в баллоне:

$$\Delta p = p - p_0 = \rho g H = \rho g (H_1 - H_2). \quad (202.1)$$

Здесь p – давление воздуха в баллоне; p_0 – атмосферное давление; ρ – плотность воды; H – разность уровней воды в коленах манометра; H_1 – высота столба воды в правом колене манометра; H_2 – высота воды в левом колене манометра.

Кран сброса воздуха (выпускной кран) K_2 предназначен для быстрого (практически без теплообмена с окружающей средой) сброса части газа из баллона в окружающую среду, приводящего к резкому уменьшению давления в баллоне.

Для определения показателя адиабаты γ с воздухом, *изначально находящимся в баллоне*, проводят последовательность термодинамических процессов, представленных на p - V -диаграмме (рис. 6), основными из которых являются процесс адиабатического расширения воздуха $1 \rightarrow 2$ и изохорического нагрева газа в баллоне $2 \rightarrow 3$. Рассмотрим процессы, из которых состоит эта диаграмма, и

остывать (процесс $\mathbf{B} \rightarrow 1$ на рис. 6) до температуры окружающей среды ($T_1 = T_0$), при этом его давление уменьшится до величины $p_1 > p_0$ и уровень жидкости в коленах манометра перестанет меняться. Давление p_1 , в соответствии с (202.1), можно определить из соотношения

$$p_1 = p_0 + \rho g H, \quad (202.2)$$

где $H = H_1 - H_2$ – разность уровней воды в коленах манометра.

Второй способ перевода газа M_0 из состояния \mathbf{A} в состояние 1 – это способ квазистатического изотермического нагнетания (процесс $\mathbf{A} \rightarrow 1$). При осуществлении такого процесса воздух в баллоне все время находится в тепловом и механическом равновесии с окружающей средой.

Таким образом, в состоянии 1 воздух M_0 характеризуется следующими параметрами: $p_1 > p_0$, $T_1 = T_0$, $V_1 < V_0$.

Процесс 1 \rightarrow 2. Состояние 2.

Для осуществления процесса $1 \rightarrow 2$ воздух в баллоне с помощью выпускного крана K_2 (см. рис. 5) кратковременно соединяют с атмосферой. При этом **часть рабочей массы воздуха m** выпускается в атмосферу и давление в баллоне падает до значения p_2 , равного атмосферному ($p_2 = p_0$). Между газом в баллоне и атмосферой устанавливается механическое равновесие. С другой стороны, при выводе части рабочего тела из системы, газ в баллоне совершает положительную работу против сил внешнего давления (процесс $1 \rightarrow 2$), что приводит к понижению температуры системы до величины T_2 .

Таким образом, воздух M_0 в состоянии 2 характеризуется следующими параметрами: $p_2 = p_0$, $T_2 < T_0$, $V_1 < V_2 < V_0$.

Очевидно, что длительность процесса $1 \rightarrow 2$ и его вид зависят как от величины избыточного давления $\Delta p_1 = \rho g H$, так и от сечения выпускного крана K_2 . В методе Клемана и Дезорма этот процесс считается **адиабатическим**. Это возможно, если $\Delta p_1 \ll p_0$, а также если сечение выпускного крана K_2 достаточно велико. Только в этом случае процесс $1 \rightarrow 2$ произойдет достаточно быстро, так, что можно пренебречь теплообменом между газом в баллоне и окружающей средой. В лабораторной установке длительность этого процесса составляет $\Delta \tau_2 \approx 0,1$ с. Для сравнения, одно моргание

человеческого глаза длится приблизительно 0,05 секунды.

Процесс 2→3. Состояние 3.

Допустим, что в конце адиабатического процесса $1 \rightarrow 2$ кран сброса воздуха K_2 закрывается. Далее воздух в баллоне начнёт изохорически медленно нагреваться (процесс $2 \rightarrow 3$) до температуры окружающей среды ($T_3 = T_0$), при этом его давление возрастет до величины $p_3 > p_0$ и уровень жидкости в коленах манометра перестанет меняться. В соответствии с (202.1) давление воздуха в баллоне p_3 можно определить из соотношения

$$p_3 = p_0 + \rho gh, \quad (202.3)$$

где $h = h_1 - h_2$ – разность уровней воды в коленах манометра.

Таким образом, в состоянии 3 газ M_0 находится в тепловом и механическом равновесии с окружающей средой и характеризуется следующими параметрами: $p_3 > p_0$, $T_3 = T_0$, $V_3 = V_2 < V_0$.

Используя описанный выше процесс $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3$, законы идеального газа и уравнение адиабатического процесса, выведем расчетную формулу для определения величины γ .

Давление и температура воздуха M_0 в процессе $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3$ (см. рис. 3) связаны следующими соотношениями:

адиабатический процесс $1 \rightarrow 2$:

$$p_1 T_0^{\frac{\gamma}{1-\gamma}} = p_0 T_2^{\frac{\gamma}{1-\gamma}}; \quad (202.4)$$

изохорический процесс $2 \rightarrow 3$:

$$\frac{p_0}{T_2} = \frac{p_3}{T_0} \Rightarrow \frac{T_2}{T_0} = \frac{p_0}{p_3}. \quad (202.5)$$

Решая совместно (202.4) и (202.5), получим следующее уравнение:

$$\left(\frac{p_1}{p_0} \right) = \left(\frac{p_1}{p_3} \right)^{\gamma}. \quad (202.6)$$

В лабораторной установке манометр позволяет измерить величину избыточного давления воздуха в баллоне. Поэтому в уравнение (202.6) следует подставить соотношения (202.2) и (202.3):

$$\frac{(p_0 + \rho gH)}{p_0} = \left(\frac{p_0 + \rho gH}{p_0 + \rho gh} \right)^{\gamma}.$$

После логарифмирования этого равенства и простых математических преобразований получаем следующее соотношение для показателя адиабаты γ воздуха:

$$\gamma = \frac{\ln\left(1 + \frac{\rho gH}{p_0}\right)}{\ln\left(1 + \frac{\rho gH}{p_0}\right) - \ln\left(1 + \frac{\rho gh}{p_0}\right)}. \quad (202.7)$$

В вышеописанном методе предполагается, что атмосферное давление p_0 много больше избыточного давления, т.е. $p_0 \gg \rho gH$ и ρgh . Тогда можно принять что $\ln(1+x) \approx x$ (первый член в разложении соотношения $\ln(1+x)$ в ряд Маклорена), где x это $(\rho gH)/p_0$ и $\rho gh/p_0$. С учетом этого из (202.7) получаем следующую простую формулу для определения показателя адиабаты воздуха:

$$\gamma = \frac{H}{H - h}. \quad (202.8)$$

Учитывая, что $H = H_1 - H_2$, а $h = h_1 - h_2$, окончательно получаем рабочую формулу для расчета показателя адиабаты воздуха:

$$\gamma = \frac{H_1 - H_2}{(H_1 - H_2) - (h_1 - h_2)}. \quad (202.9)$$

В формуле (202.8) под величиной h понимается разность уровней воды в коленах манометра, возникающая в предположении, что кран K_2 закрывается в момент окончания адиабатического расширения $1 \rightarrow 2$ (см. рис. 3).

Если кран K_2 закрыть спустя некоторое время после завершения процесса $1 \rightarrow 2$, то за это время температура в баллоне изобарно повысится (процесс $2 \rightarrow 2'$ на рис. 3). В этом случае соответствующая разность высот $(H - h)$ увеличится, что приведет к уменьшению значения γ . Если же кран закрыть до завершения этого процесса, то разность высот $(H - h)$ уменьшается, что приводит к увеличению величины γ по сравнению с ее действительным значением.

Таким образом, для получения «хороших» результатов выпускной кран K_2 необходимо закрыть в момент окончания адиабатного процесса $1 \rightarrow 2$.

2.7. Порядок выполнения работы

Ознакомиться с рабочей установкой. Если ручка кранов K_1 и K_2 расположена параллельно проводу – кран находится в открытом состоянии (положение «Открыто»), если перпендикулярно проводу – кран закрыт (положение «Закрыто»). Особое внимание обратите на манометр и его шкалу. Одна из частей шкалы манометра позволяет производить измерения с точностью до 0,5 мм.

Процедура выполнения лабораторной работы в соответствии с рассмотренной методикой заключается в следующем.

1. Рассчитать по формуле $H_{10} = (200 + B \cdot 10)$ мм, где B – номер бригады в преподавательском журнале, «начальное» значение высоты уровня воды в правом колене манометра. Для сравнения: нормальное атмосферное давление составляет примерно 10 м водного столба.

2. Перевести краны K_1 и K_2 в положение «Открыто». Уровни воды в коленах манометра при этом должны установиться на одной высоте.

ВНИМАНИЕ. *Насосом необходимо работать так, чтобы вода из манометра не выливалась.*

3. Перевести кран K_2 в положение «Закрыто». Насосом накачать в баллон воздух до тех пор, пока воды в правом колене манометра не поднимется до уровня $\approx 270 - 280$ мм. После окончания процесса нагнетания воздуха закрыть напускной кран K_1 .

4. Наблюдать за показаниями манометра. Приблизительно через $2 \div 3$ минуты уровень воды в коленах манометра перестанет меняться.

ВНИМАНИЕ. *В случае, если показание манометра все время уменьшается, что свидетельствует об утечке воздуха из системы, необходимо обратиться к преподавателю.*

Если высота уровня воды в правом колене манометра превышает H_{10} более чем на 2 мм, то с помощью напускного крана K_1 , необходимо (**максимально медленно!!!**) выпустить из баллона такое количество воздуха, что бы уровень воды в правом колене стал приблизительно равным H_{10} . После этого в течение $10 \div 20$ секунд (зависит от скорости истечения воздуха из сосуда) уровень воды в правом колене манометра может увеличиться.

Если высота уровня воды в правом колене манометра окажется меньше чем H_{10} более чем на 2 мм, то необходимо вернуться к п. 2.

Окончательные данные высот уровней воды в правом H_1 и левом H_2 коленах занести в табл. 3.

5. Придерживая левой рукой установку в целом, правой рукой кратковременно открыть выпускной кран K_2 , соединив баллон с атмосферой. Как только завершится процесс истечения воздуха из сосуда (момент, когда уровни воды в коленах манометра **в первый раз!!!** находятся на одном уровне и/или прекратится характерный шум («резкий выдох»)), закрыть кран K_2 . После этого, вода в манометре некоторое время совершает затухающие колебания.

6. Наблюдать за показаниями манометра. Как только уровень жидкости в коленах манометра перестанет меняться (приблизительно через $2 \div 3$ минуты), данные высот уровней воды в правом h_1 и левом h_2 коленах манометра занести в табл. 3.

7. Провести аналогичные измерения (пп. 2 – 6) не менее 5 раз.

8. После окончания экспериментальной части лабораторной работы краны K_1 и K_2 перевести в положение «Открыто».

Таблица 3

Результаты измерений высот уровня воды в манометре

№ опыта $i \downarrow$	H_{1i} , мм	H_{2i} , мм	h_{1i} , мм	h_{2i} , мм
1				
...				
N				

2.8. Обработка результатов измерений и расчёт погрешностей

Результаты многократных прямых измерений, приведенные в табл. 3. необходимо обработать методом Стьюдента. Рассмотрим данную методику на примере обработки высот уровня воды в правом колене манометра H_{1i} .

1. Определить среднее арифметическое значение высоты уровня воды в правом колене $\langle H_1 \rangle$:

$$\langle H_1 \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_{1i},$$

где N – число опытов в серии.

2. Вычислить величины случайных отклонений высот:

$$\varepsilon_i = \langle H_1 \rangle - H_{1i}.$$

3. Вычислить квадраты случайных отклонений: ε_i^2 .

4. Вычислить среднее квадратичное отклонение среднего арифметического:

$$S_N = \sqrt{\frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=1}^N \varepsilon_i^2}.$$

5. Определить по таблице в [4] коэффициент Стьюдента $t_{\alpha,N}$, зависящий от доверительной вероятности α и числа опытов N в данной серии измерений.

6. Вычислить случайную погрешность среднего арифметического значения высоты столба жидкости (оценочное значение абсолютной погрешности):

$$\Delta H_1 = S_N t_{\alpha,N}.$$

7. Аналогично обработать приведенные в табл. 3 результаты многократных прямых измерений величин H_{2i} , h_{1i} и h_{2i} .

8. Результаты выполнения пп. 1 – 7 представить в виде табл. 4.

Таблица 4

Обработка результатов прямых измерений

№ опыта	H_i	$\langle H \rangle$	ε_i	ε_i^2	S_N	$t_{\alpha,N}$	ΔH_i
H_1	1						
	...						
	N						
H_2	1						
	...						
	N						
h_1	1						
	...						
	N						
h_2	1						
	...						
	N						

8. Записать окончательные результаты обработки прямых измерений в соответствии с требованиями, предъявляемыми к форме записи результата измерения физической величины (см. [4]):

$$H_1 = \langle H_1 \rangle \pm \Delta H_1, \quad H_2 = \langle H_2 \rangle \pm \Delta H_2,$$

$$h_1 = \langle h_1 \rangle \pm \Delta h_1, \quad h_2 = \langle h_2 \rangle \pm \Delta h_2.$$

9. Вычислить относительные погрешности измерения высот жидкости в правом и левом коленах манометра:

$$\delta H = \frac{\Delta H}{\langle H \rangle}.$$

10. Используя данные п.8, по формуле

$$\langle \gamma \rangle = \frac{\langle H_1 \rangle - \langle H_2 \rangle}{(\langle H_1 \rangle - \langle H_2 \rangle) - (\langle h_1 \rangle - \langle h_2 \rangle)}$$

вычислить среднее значение величины отношения молярных теплоемкостей воздуха в процессах при постоянном давлении и при постоянном объеме $\langle \gamma \rangle$.

11. Вычислить по формуле

$$\Delta \gamma = \frac{\langle \gamma \rangle}{A} \sqrt{\left(\frac{\langle h_1 \rangle - \langle h_2 \rangle}{\langle H_1 \rangle - \langle H_2 \rangle} \right)^2 (\Delta H_1^2 + \Delta H_2^2) + (\Delta h_1^2 + \Delta h_2^2)},$$

где $A = (\langle H_1 \rangle - \langle H_2 \rangle) - (\langle h_1 \rangle - \langle h_2 \rangle)$, абсолютную погрешность значения показателя адиабаты воздуха.

12. Записать окончательный результат в соответствии с требованиями, предъявляемыми к форме записи результата измерения физической величины (см. [4]):

$$\gamma = \langle \gamma \rangle \pm \Delta \gamma.$$

13. Вычислить относительную погрешность измерения показателя адиабаты воздуха γ :

$$\delta \gamma = \frac{\Delta \gamma}{\langle \gamma \rangle}.$$

14. Сравнить полученное значение $\langle \gamma \rangle$ с теоретическим значением этой величины, рассчитанным по формуле (14), считая воздух двухатомным идеальным газом.

15. Оформить отчет по результатам работы.

2.9. Список ориентировочных контрольных вопросов для допуска к выполнению и защиты лабораторной работы

Вопросы по методике эксперимента

1. Какие термодинамические процессы происходят с воздухом при выполнении работы? Объясните по рис. 3.
2. Выведите рабочую формулу для определения показателя адиабаты воздуха.
3. Почему для вычисления показателя адиабаты выбирается соотношение (202.9), а не (202.7)?
4. При нагнетании рабочей массы воздуха m в баллон его температура увеличивается. Каковы причины этого явления? Как можно вычислить это изменение температуры?
5. Почему происходит понижение температуры газа при открывании крана K_2 ? Как зависит величина понижения температуры газа в баллоне от рабочей массы воздуха m ?
6. Как можно вычислить температуру воздуха в конце адиабатического расширения (см. рис. 3, процесс $1 \rightarrow 2$)?
7. Как можно вычислить работу воздуха при его адиабатическом расширении (см. рис. 3, процесс $1 \rightarrow 2$)?
8. Докажите, что если кран K_2 в установке закрыть до завершения процесса $1 \rightarrow 2$ (см. рис. 3), то вычисления значения γ по формуле (202.9) приводят к увеличению его величины по сравнению с действительным значением γ .
9. Как зависит величина избыточного давления в баллоне при изохорном нагревании $2 \rightarrow 3$ (см. рис. 3), от времени открывания выпускного крана K_2 ?
10. Как можно вычислить количество газа в граммах, которое закачивается и выпускается из баллона?
11. Как влияет влажность воздуха на величину измеренного значения γ , завышают или занижают это значение и почему?
12. Почему на практике сложно реализовать квазиравновесный адиабатический процесс?
13. Почему после закрытия крана K_2 (см. п.5 порядка выполнения работы) вода в манометре будет совершать затухающие колебания? Как этот процесс влияет на результаты измерений?
14. Выведите формулу (202.4).

Теоретические вопросы

1. Какой газ называется идеальным? При каких условиях реальные газы можно считать идеальными газами?
2. Какими термодинамическими параметрами характеризуется состояние газов? Каков физический смысл этих величин и как измеряются эти величины?
3. Какое уравнение называется уравнением состояния идеального газа?
4. Какие процессы называются изопроцессами? Запишите уравнения изопроцессов в идеальных газах.
5. Изобразите графики изопроцессов в различных системах координат: (p, V) , (p, T) и (V, T) .
6. Выведите формулу для элементарной работы расширения газа.
7. Выведите формулы для расчета работы идеального газа при различных изопроцессах.
8. Что понимается под количеством теплоты? Какие существуют способы теплопередачи? Приведите примеры.
9. Что характеризует теплоемкость системы? Удельная и молярная теплоемкости системы?
10. Сформулируйте теорему о равномерном распределении энергии по степеням свободы. Как на основе этой теоремы определяется внутренняя энергия идеального газа?
11. Что понимается под внутренней энергией макроскопической системы? От каких параметров состояния зависит внутренняя энергия системы?
12. Сформулируйте первый закон термодинамики и запишите его математическое выражение для различных изопроцессов в идеальном газе.
13. Дайте определение адиабатического процесса и выведите его уравнение (уравнение Пуассона). Представьте это уравнение в параметрах (p, T) и (V, T) .
14. Почему теплоёмкость системы зависит от способа нагревания?

3. СОДЕРЖАНИЕ И ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ ОТЧЕТА ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

Отчёт по лабораторной работе оформляется *индивидуально* каждым студентом, выполнившим необходимые эксперименты (независимо от того, выполнялся ли эксперимент индивидуально или в составе группы студентов). Объём отчёта должен быть оптимальным для понимания того, что и как сделал студент, выполняя работу.

Возможны несколько вариантов оформления отчета:

– на белой бумаге форматом А4 с одной стороны листа с применением печатающих устройств вывода ЭВМ. *Формулы и схемы* при этом должны быть аккуратно *вписаны от руки* синей или черной пастой;

– на белой бумаге форматом А4 с одной стороны листа в рукописном виде, с четким и разборчивым почерком;

– на двойных тетрадных листах в клетку, при этом допускается писать на обеих сторонах.

Отчет по лабораторной работе обязательно должен включать следующие пункты.

1. Титульный лист.

Титульный лист является первым листом отчета. Он не нумеруется. Следующая за титульным листом страница нумеруется цифрой 2. Пример оформления титульного листа приводится в конце данного подраздела.

2. Цель работы.

Цель работы отражает тему лабораторной работы, а также конкретные задачи, поставленные студенту на период выполнения работы.

3. Приборы и принадлежности.

В данном пункте необходимо перечислить приборы и оборудование, с помощью которых исследовалось физическое явление и измерялись физические величины. Для всех приборов, с помощью которых производились прямые измерения физических величин, необходимо составить по нижеприведённой форме таблицу.

Таблица 5

Характеристики измерительных приборов

№	Название	Диапазон измерений	Число делений	Цена деления	Класс точности	Погрешность прибора
1						
...						
N						

4. Краткие теоретические сведения.

В данном пункте необходимо привести основные понятия и законы изучаемого в работе явления или процесса. Объем этого пункта не должен превышать 1/3 части всего отчета.

5. Описание экспериментальной установки и методики эксперимента.

В данном пункте приводится схема экспериментальной установки с кратким описанием её работы, излагается методика проведения эксперимента.

6. Расчетные формулы и формулы для оценки погрешности косвенных измерений.

В данном пункте приводятся только те формулы, которые будут использованы для определения численных значений физических величин, а также формулы для расчета погрешностей измерений. Все промежуточные формулы не приводятся.

7. Выполнение работы.

В этом пункте приводятся непосредственно результаты, полученные в ходе выполнения лабораторной работы: экспериментально определенные значения физических величин и результаты косвенных измерений, таблицы, графики, диаграммы.

8. Выводы по работе.

В этом пункте формулируются выводы по работе, содержание которых зависит от цели работы.

В тех случаях, когда целью работы является изучение каких-либо законов, то в выводах необходимо сделать заключение о том, подтверждаются ли экспериментом рассматриваемые законы или нет.

В тех случаях, когда в ходе выполнения лабораторной работы определяются известные константы, в выводах необходимо привести сравнение полученных результатов с табличными значениями констант.

В выводах нужно также указать возможные причины расхождения теоретических и практических результатов.

Образец оформления лицевой стороны титульного листа

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«ЮЖНЫЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

(Полное название института)

(Кафедра)

(Направление подготовки)

Отчет
по лабораторной работе №***
по курсу Физика

(НАЗВАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ)

Выполнил:
студент группы ААб01-11
Иванов И.И.
30 мая 20** г.

Преподаватель: *Сидоров И.И.*

Таганрог 20** г.

Библиографический список

1. Савельев И.В. Курс физики: учебное пособие: в 3-х т. Т.1. Механика. Молекулярная физика – 3-е изд., стер. – СПб.: Лань, 2007. – 352 с.
2. Трофимова Т.И. Курс физики: учебное пособие для студентов вузов. – М.: Издательский центр «Академия», 2008. – 560 с.
3. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики: учеб. пособие для студентов вузов. – М.: Высшая школа, 1999. – 718 с.
4. Волощенко В.Ю., Сапогин В.Г. Оценка погрешностей при физических измерениях. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2004. – 31 с.

СОДЕРЖАНИЕ

1. Равновесный адиабатический процесс. Теплоёмкость идеального газа	3
2. Лабораторная работа №202. Определение отношения молярных теплоемкостей воздуха в процессах при постоянном давлении и при постоянном объеме методом Клемана и Дезорма	9
3. Содержание и правила оформления отчета по лабораторной работе	22

Арзуманян Грайр Вагаршакович

Руководство
к лабораторной работе №202
**Определение отношения молярных теплоемкостей
воздуха в процессах при постоянном давлении и
при постоянном объеме
методом Клемана и Дезорма**

Ответственный за выпуск Арзуманян Г.В.

Редактор Проценко И.А.

Корректор Проценко И.А.

Подписано в печать

Заказ № . Тираж 30 экз.

Формат 60×84 ¹/₁₆ . Усл. печ. л. – 1,7. Уч.-изд. л.– 1,5.

Издательство Южного федерального университета
344091, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 200/1. Тел. (8634)2478051.
Отпечатано в Секторе обеспечения полиграфической продукцией
кампуса в г. Таганроге отдела полиграфической, корпоративной и
сувенирной продукции ИПК КИБИ МЕДИА ЦЕНТРА ЮФУ
ГСП 17А, Таганрог, 28, Энгельса, 1.
Тел. (8634)371717, 371655.

