

Министерство образования и науки Российской Федерации.
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Нижегородский государственный строительный университет»

Кафедра Физики

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ ТЕПЛОЕМКОСТЕЙ ВОЗДУХА

**Методические указания к выполнению лабораторной работы № 4 для студентов
специальностей 271101, 230400.62, 120700.62, 270800.62, 221700.62, 022000.62**

Нижегород
ННГАСУ
2012

УДК 536.711

Определение отношения теплоемкостей воздуха. Методические указания к выполнению лабораторной работы № 4 для студентов специальностей 271101, 230400.62, 120700.62, 270800.62, 221700.62, 022000.62 \ Нижегород. гос. архитектур.-строит. ун-т; сост. Коган Л.П - .Новгород, ННГАСУ, 2012. – 19с.

Излагаются основы классической теории идеального газа. Дается определение теплоемкостей газа, описание лабораторной установки и метода измерения отношения теплоемкостей воздуха при постоянном давлении и при постоянном объеме.

Таблиц 2, рис. 5, библиографич. назв. 4.

Составитель: к. ф.-м. н., доц. Л. П. Коган
Редактор: д.ф.-м.н., профессор Бархатов Н.А.

Цель работы — экспериментальное определение показателя адиабатического процесса $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$ для воздуха, где c_p , c_v — соответственно молярные теплоемкости идеального газа при постоянном давлении P и постоянном объеме V .

ОБЩИЙ ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ И СДАЧИ ОТЧЁТА

При выполнении заданий по данной работе Вы на практике применяете знания по основам классической теории идеального газа. Для эффективного усвоения материала порядок работы должен быть следующий:

1. До выполнения лабораторной работы необходимо прочитать данные методические указания и повторить основные теоретические понятия, которые используются в работе.

2. Перед выполнением работы необходимо сдать теоретический допуск. Для удовлетворения минимальным требованиям надо уметь отвечать на вопросы разделов 1, 2, 4.1 методических указаний. Эти методические указания имеются в библиотеке ННГАСУ, их можно также получить на кафедре или взять на сайте кафедры физики в электронном виде.

3. После сдачи допуска, проводятся необходимые измерения и оформление протокола. Протокол измерений может быть один на бригаду студентов. Он должен быть показан преподавателю, который зафиксирует выполнение работы. Преподаватель назначает Вам дату сдачи работы, к которой Вам следует оформить отчёт (обычно это следующее лабораторное занятие). Отчёт оформляется индивидуально и студент обязан объяснить все этапы выполнения лабораторной работы и расчетов, которые в отчете содержатся. Студенту перед сдачей отчета рекомендуется добиться полной ясности в понимании использованных физических законов и каким образом получают применяемые формулы.

4. Защита лабораторной работы состоит в ответе на вопросы по отчёту, связанные с практическими измерениями,

а также с демонстрацией студентом умения решать задачи по соответствующей теме. При подготовке рекомендуем, во-первых, убедиться, что Вы умеете решать простейшие задачи, а кроме того проанализировать задания в конце данной брошюры. В случае успешной защиты, преподаватель делает в журнале пометку о сдаче лабораторной работы студентом с указанием рейтингового балла.

I. Теоретическое введение

В результате многочисленных экспериментов установлено, что свойства большинства веществ, находящихся в газообразном состоянии при не очень большом давлении, могут быть описаны уравнением **Менделеева — Клапейрона**:

$$PV = \frac{m}{\mu} RT. \quad (1)$$

Здесь m - масса газа заключенного в объем V при давлении P и температуре T , $\frac{m}{\mu}$ — число молей газа, величина μ — масса одного моля, R - универсальная газовая постоянная. Модем (моль) называется количество вещества, масса которого, выраженная в граммах, численно равна его весу в атомных единицах массы (см. периодическую таблицу Менделеева). Например, для азота N_2 $\mu = 0,028 \text{ кг/моль}$, кислорода O_2 $\mu = 0,032 \text{ кг/моль}$, паров воды H_2O $\mu = 0,018 \text{ кг/моль}$. Воздух является смесью газов - он состоит из азота (78% по объему), кислорода (21%) и остальная доля (порядка 1%) образована аргоном, гелием, неонем, углекислым газом, парами воды, поэтому для воздуха $\mu = 0,029 \text{ кг/моль}$.

В одном моле вещества содержится одинаковое число молекул, это число называется числом Авогадро $N_A = 6.02 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{моль}}$. Согласно закону Авогадро, 1 моль идеального газа при нормальных условиях: температуре $t = 0^\circ C$, т.е. $T = t + 273 = 273 K$, давлении $p = 1 \text{ атм} = 760 \text{ мм рт.ст.} = 1.013 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2 = 101.3 \text{ кПа}$, занимает объем $V_{\text{мол}} = 0.0224 \text{ м}^3 / \text{моль} = 22.4 \text{ литра} / \text{моль}$. Подставляя эти данные в формулу (1) закона Менделеева-Клапейрона при $\frac{m}{\mu} = 1 \text{ моль}$,

получим значение универсальной газовой постоянной $R = 8.31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$.

Уравнение Менделеева—Клапейрона хорошо описывает свойства разреженных газов, плотность которых $\rho = \frac{m}{V}$ примерно в 10^3 раз меньше плотности жидкости $\rho_{ж}$. В жидкости молекулы расположены очень близко друг к другу. Отсюда следует, что в разреженных газах среднее расстояние r_{cp} между молекулами в десятки раз больше их собственных размеров d , т.е. $r_{cp} \geq 10d$. Молекулы разреженного газа, находящегося при температуре T , совершают хаотическое тепловое движение, свободно пробегая путь между двумя последовательными столкновениями друг с другом или со стенками сосуда. Соударения молекул друг с другом или со стенками сосуда происходят без потери энергии, по законам соударения упругих тел. Это основное представление для молекулярно-кинетической теории идеальных газов. Оно позволяет объяснить их свойства. Согласно этой теории, молекулы-«шарики» (аргона, гелия, неона) движутся между упругими столкновениями поступательно. Такому движению соответствует число степеней свободы, равное

$$i = i_{\text{пост}} = 3 \quad (2)$$

Напомним, что число степеней свободы называется число независимых координат, которое надо задать для определения положения тела в пространстве. Для поступательного движения тела в пространстве это координаты x, y, z . Следовательно, $i = 3$. Молекулы-«гантельки» двухатомных газов (водорода, азота, кислорода) могут двигаться как поступательно (поступательное движение центра массы молекулы, $i_{\text{пост}} = 3$), так и вращаться вокруг осей, проходящих через центр массы молекулы: $i_{\text{вр}} = 2$. Вращением молекулы вокруг продольной оси пренебрегаем, так как такому движению соответствует малое значение момента инерции по сравнению с другими осями.

В результате для молекул-«гантелек» получим:

$$i = i_{\text{пост}} + i_{\text{вр}} = 3 + 2 = 5 \quad (3)$$

Тогда упрощенная механическая модель молекул позволяет объяснить основные свойства идеальных газов.

Согласно молекулярно-кинетической теории идеального газа средняя кинетическая энергия одной молекулы пропорциональна абсолютной температуре T газа:

$$\langle W \rangle = \frac{i}{2} \frac{R}{N_A} T = \frac{i}{2} kT, \quad k = \frac{R}{N_A} = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}, \quad (4)$$

где k — постоянная Больцмана, i — число степеней свободы молекул газа (см. (2) и (3)).

Полный запас внутренней энергии газа, заключенного в сосуд объемом V при температуре T , получим умножением $\langle W \rangle$ на число молекул N газа:

$$U = \langle W \rangle N = \frac{N}{N_A} \frac{i}{2} RT = \frac{m}{\mu} \frac{i}{2} RT. \quad (5)$$

Значение внутренней энергии газа U , заключенного в закрытый сосуд объемом V при давлении P и температуре T (см. рис. 1), можно изменить в результате внешних воздействий — передавая газу тепло ΔQ (нагрев $\Delta Q > 0$, охлаждение $\Delta Q < 0$) и совершая над газом работу $\Delta A' = F \Delta h$ под действием внешней силы $F = PS$; Δh — смещение поршня сечения S . Очевидно, что $\Delta A' = PS \Delta h = P \Delta V$.

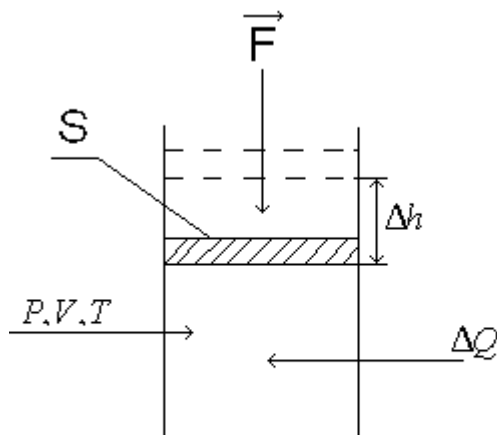


Рис. 1

Переданное тепло ΔQ и работа внешних сил $\Delta A'$ изменяют внутреннюю энергию на некоторое значение ΔU . Эти величины связаны между собой законом сохранения энергии, который для систем многих частиц называется **первым законом термодинамики**:

$$\Delta Q = \Delta U - \Delta A',$$

ИЛИ

$$\Delta Q = \Delta U + \Delta A, \quad (6)$$

где ΔA — работа газа против внешних сил, поскольку $\Delta A' = -\Delta A$.

Количество теплоты, переданное системе, расходуется на изменение внутренней энергии системы и на совершение системой работы против внешних сил.

Согласно (6), энергия хаотического теплового движения молекул ΔU может быть преобразована в механическую работу $\Delta A = P\Delta V$.

Рассмотрим вопрос о **молярных теплоемкостях газов**. Молярная теплоемкость C численно равна количеству тепла ΔQ , которое надо сообщить одному молю этого вещества (масса $m = \mu$), чтобы нагреть его на $\Delta T = 1^\circ$. Тогда можно записать $C = \frac{\Delta Q}{\Delta T}$.

Для газов надо различать, при каких условиях происходит нагрев — например, при постоянном объеме $V = const$, или при постоянном давлении $P = const$. Для процесса $V = const$ имеем $\Delta V = 0$ и $\Delta A = P\Delta V = 0$. Поэтому, согласно первому закону термодинамики (6), все сообщенное газу тепло ΔQ идет на увеличение внутренней энергии ΔU газа.

$$\begin{cases} \Delta Q = \Delta U = U(T + \Delta T) - U(T) = \frac{i}{2} R \Delta T \\ C_v = \frac{\Delta Q}{\Delta T} = \frac{i}{2} R \end{cases} \quad (7)$$

Для процесса $P = const$ газ расширяется, и сообщаемое тепло ΔQ идет на увеличение внутренней энергии ΔU и на работу $\Delta A = P\Delta V$ против внешних сил: $\Delta Q = \Delta U + \Delta A$ (см. (6)). Увеличение объема ΔV можно найти из уравнения состояния идеального газа (1). При $P = const$ имеем $\Delta V = \frac{R}{P} \Delta T$. Подставляя это ΔV в выражение для работы, получим $\Delta A = P\Delta V = R\Delta T$. Отсюда, используя (6), (7), получим выражение для теплоемкости одного моля идеального газа при постоянном давлении $P = const$:

$$C_p = \frac{\Delta Q}{\Delta T} = \frac{\Delta U + \Delta A}{\Delta T} = C_v + R = \frac{i+2}{2} R. \quad (8)$$

Согласно (7), (8), теплоемкости C_p и C_v зависят от R и числа степеней свободы i молекул идеального газа. Для одноатомного газа (молекулы-«шарики») $i = 3$, для двухатомного

газа (молекулы-«гантельки») $i=5$ (см. формулу (3)). Отношение теплоемкостей $\frac{C_p}{C_v}$ равно:

$$\frac{C_p}{C_v} = \gamma = \frac{i+2}{i} \quad (9)$$

Согласно (2), для одноатомных газов, когда $i=3$, отношение $\frac{C_p}{C_v} = \frac{5}{3} \approx 1.67$; для двухатомных газов, когда $i=5$, имеем $\frac{C_p}{C_v} = \frac{7}{5} = 1.4$. Напомним, что воздух образован смесью двухатомных газов — азота N_2 и кислорода O_2 (99% состава воздуха).

В заключение рассмотрим **основные газовые процессы** при $\frac{m}{\mu} = 1$ и их графики (см. рис. 2).

Изохорический процесс: $V = const, \Delta V = 0$.

Согласно (1), (5), (7)

$$\frac{P}{T} = const, \Delta Q = \Delta U = C_v \Delta T, \Delta A = 0. \quad (10.1)$$

Изобарический процесс:

$$P = const, \Delta P = 0, \frac{V}{T} = const, \Delta Q = C_p \Delta T, C_p = C_v + R. \quad (10.2)$$

Изотермический процесс:

$$T = const, PV = const, \Delta U = 0, \Delta Q = P \Delta V. \quad (10.3)$$

Адиабатный процесс: $\Delta Q = 0$ — имеет место при идеальной теплоизоляции или в случае очень быстрого процесса, при котором теплообмен между термодинамической системой и окружающей средой просто не успевает произойти. В этом случае $\Delta Q = C_v \Delta T + P \Delta V = 0$, т.е. расширение газа $\Delta V > 0$ возможно только за счет внутренней энергии. При таком расширении газ охлаждается: $\Delta T < 0$.

В данном приближении получим уравнение адиабатного процесса при $\frac{m}{\mu} = 1$: $\Delta Q = C_v \Delta T + P \Delta V = 0$. Согласно (1), (8)

$P = R \frac{T}{V} = (C_p - C_v) \frac{T}{V}$. Поделим уравнение $C_v \Delta T + P \Delta V = 0$ на T и C_v . В итоге: $\frac{\Delta T}{T} + \frac{C_p - C_v}{C_v} \frac{\Delta V}{V} = 0$, или, переходя к бесконечно малым

величинам, получаем уравнение $\frac{dT}{T} + (\gamma - 1) \frac{dV}{V} = 0$, где $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$ (см. (9)). Интегрируя это уравнение которое, получаем $TV^{(\gamma-1)} = const$ -

уравнение адиабаты на плоскости переменных (T, V) . Используя (1), на плоскости (P, V) запишем уравнение адиабаты в форме

$$PV^\gamma = const \quad (10.4)$$

Основные газовые процессы на плоскости (P, V) представлены на рис. 2. Рисунок выполнен для случая $\gamma = \frac{C_p}{C_v} > 1$ и так, что все процессы проходят через одну точку A , в которой они пересекаются.

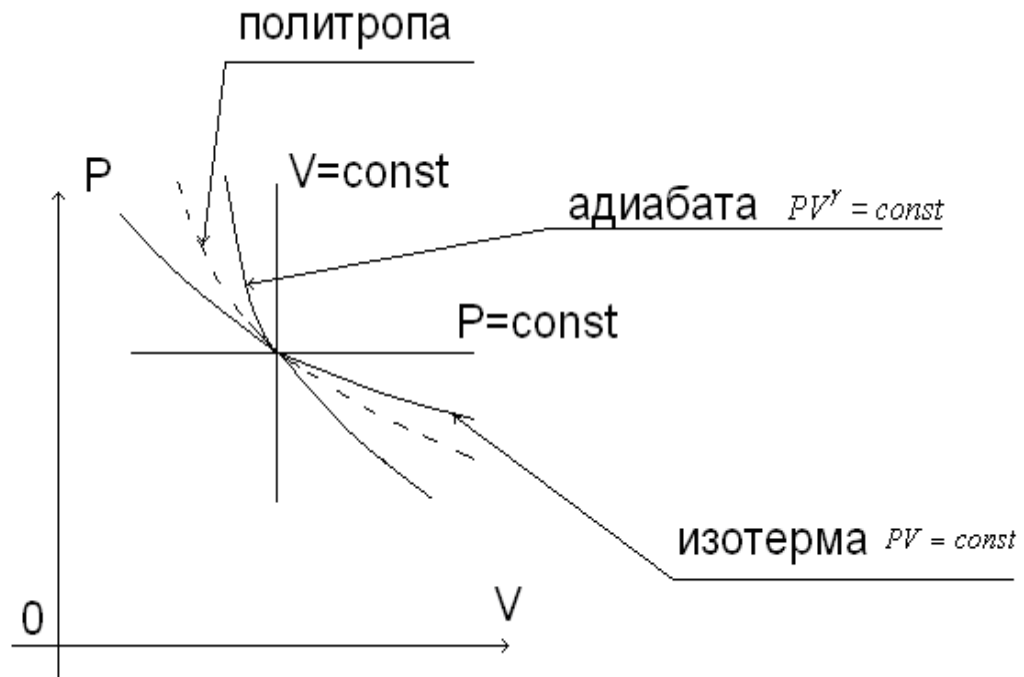


Рис. 2. Основные газовые процессы в идеальных газах

Из графиков на рис. 2 видно, что адиабата спадает круче изотермы, поскольку для нее значение $\gamma = \frac{C_p}{C_v} > 1$. Например, для двухатомных газов $i=5$ и значение $\gamma = 1.4$ (см. (3), (9)).

Условия, при которых протекают изотермический и адиабатический процессы. Процессы с $T = const$, т.е. с нулевым изменением температуры газа, возможны только при беспрепятственном теплообмене с окружающей средой. Адиабатический процесс с $\Delta Q = 0$ возможен только при полной теплоизоляции от окружающей среды. Полная теплоизоляция на практике не реализуется. Это условие приближенно выполнимо только для очень быстрых процессов.

Процессы, занимающие промежуточное положение между двумя этими крайними случаями, осуществимыми на практике, называются **политропными**. Это процессы, при которых происходит частичный теплообмен со средой.

Политропные процессы. На плоскости (P, V) эти процессы представляются кривой политропы. Она занимает промежуточное положение между изотермой и адиабатой.

$$PV^n = const, 1 < n < \gamma. \quad (11)$$

Изотермический и адиабатный процессы можно рассматривать как частные случаи политропного процесса (для которых $n=1$ и $n=\gamma$). Численные значения n определяются экспериментально. На рис. 2 политропный процесс вида (11) качественно представлен пунктирной линией.

Представления об основных газовых процессах (см. рис. 2) используются в различных областях науки и техники. Например, процесс сжатия газов в звуковой волне акустических частот f диапазона $16 \div 20000$ Гц в атмосфере Земли является адиабатическим процессом, так как рассматриваемый процесс достаточно быстрый. Максимальный период $\tau = \frac{1}{f}$ соответствует частоте $f \approx 20$ Гц и составляет $\tau \approx \frac{1}{20} = 5 \cdot 10^{-2}$ секунд. При распространении волны образуются области повышенного и пониженного давления относительно давления атмосферного. Однако чередование процессов сжатия и разряжения в этих областях происходит настолько быстро, что теплообмен между такими областями не успевает произойти. Соответственно, различие между экспериментальными скоростями распространения звука и теоретическими значениями не превосходит 1%.

Процесс сжатия горючей смеси в двигателях внутреннего сгорания происходит достаточно быстро, но, как известно, в этих двигателях используется система охлаждения. Следовательно, эти процессы не являются адиабатными. В различных автомобильных фирмах разработаны установки для экспериментального измерения показателя политропы n (11). Знание значения n позволяет конструкторам согласовывать

движение поршня с упругими свойствами рабочей смеси. В результате удается повысить экономические показатели работы двигателя и снизить расход бензина.

II. Лабораторная установка и метод измерения

Для измерения соотношения $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$ (10.4) изготовлена лабораторная установка (рис. 3), в которой в качестве рабочего тела используется воздух.

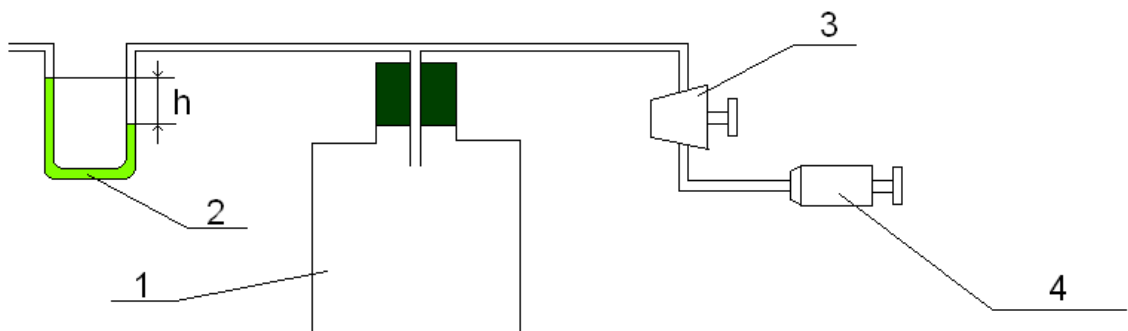


Рис. 3
Схема лабораторной установки

На рис. 3 показаны: 1 — сосуд с воздухом, 2 — водяной манометр U-образной формы (для удобства измерений вода подкрашена), 3 — кран, соединяющий сосуд с атмосферой или с насосом, h — разности уровней водяного столба в манометре, 4 — насос. На этом рисунке показания манометра соответствуют давлению в сосуде $P = P_{атм} + \rho gh$, ρ — плотность воды, $g \approx 10 \frac{M}{c^2}$.

В этой установке можно выполнить два процесса: адиабатическое расширение, при котором воздух в установке охлаждается до $T_2 < T_{атм}$; изохорический процесс нагревания воздуха от T_2 до $T_{атм}$. Графики этих процессов на плоскости (P, V) , реализуемых в лабораторной установке, проведены на рис. 4.

1. **Исходное состояние** (точка (1) на рис. 4) с $P_1 > P_{атм}$ и $T_1 = T_{cp}$ получают, предварительно накачав насосом воздух в сосуд до давления $P_1 > P_{атм}$. Для этого предварительно соединяют краном 3 сосуд 1 с насосом 4. Затем, после накачивания, кран

закрывают. Когда показания манометра станут стабильными (газ остынет после накачивания и температура станет равной температуре среды (комнатной температуре: $T_1 = T_{cp}$)), измеряют давление P_1 :

$$P_1 = P_{атм} + \rho g h_1 \quad (12)$$

и записывают значение h_1 разности высот в коленях манометра в таблицу. Рекомендованные значения h_1 составляют $15 \div 20$ сантиметров.

2. **Открывают кран (3)**, сообщая сосуд с атмосферой. При этом часть воздуха выходит в атмосферу, и давление газа быстро выравнивается с атмосферным давлением $P_{атм}$ (точка (a) на рис. 4).

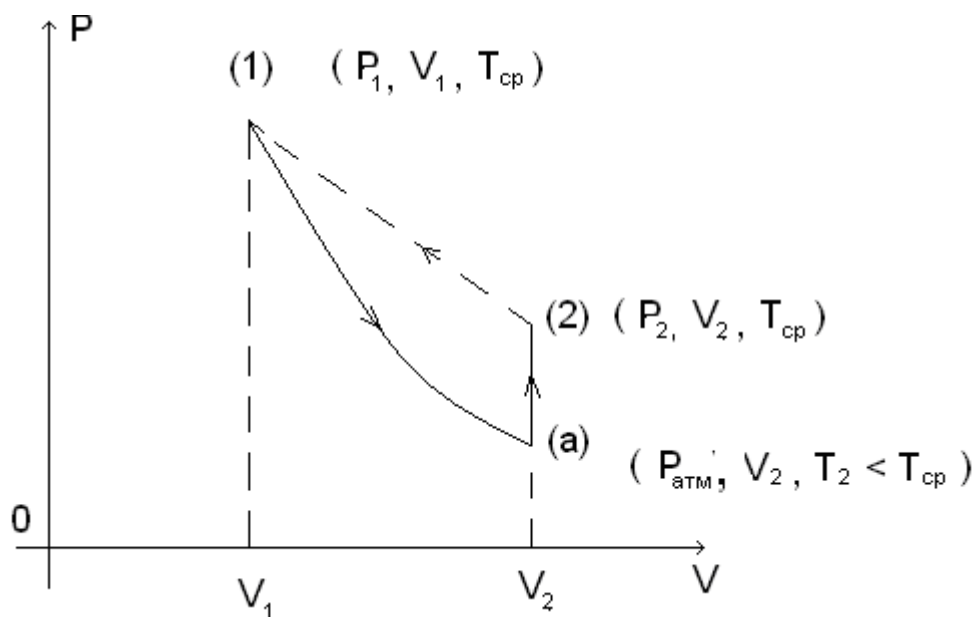


Рис. 4. Графики процессов, реализуемых в лабораторной установке

После этого кран быстро закрывают (при показаниях манометра $h \approx 0$). Таким образом, оставшаяся часть воздуха массой m_1 расширилась и заняла весь объем сосуда $V_2 = V_{сосуда}$. Заметим, в первом состоянии $P_1 > P_{атм}$ эта масса воздуха m_1 занимала только часть объема $V_1 < V_{сосуда}$. Если выполненный процесс расширения происходит достаточно быстро, без

теплообмена с атмосферой, то для такой массы газа m_1 применим закон адиабатического расширения

$$P_1 V_1^\gamma = P_{атм} V_2^\gamma, \text{ или } \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^\gamma = \frac{P_1}{P_{атм}} \quad (13)$$

Здесь необходимо учитывать, что в точке (а) объем $V_2 = V_{сосуда}$, а давление равно $P_{атм}$. В результате этого расширения воздух в сосуде охладился до температуры $T_2 < T_{атм}$, а его давление уменьшилось до $P_{атм}$.

3. Последний переход. Газ в сосуде в результате контакта с окружающей средой нагревается при постоянном объеме до комнатной температуры T_{cp} (точка (2) на рис. 4). Здесь давление P_2 можно определить по показаниям манометра h_2

$$P_2 = P_{атм} + \rho g h_2. \quad (14)$$

Показания манометра h_2 необходимо занести в таблицу.

Таким образом: состояния «1» и «2» имеют одинаковые температуры $T_1 = T_3 = T_{cp}$ и, следовательно, из уравнения Менделеева-Клапейрона имеем

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{P_1}{P_2}; \quad (15)$$

состояния «1» и «а» связаны адиабатическим процессом, для которого выполняется формула (13).

Выполним теперь **необходимые расчеты для получения значения показателя политропы.** Введем для удобства записи обозначения $P_3 = \rho g h_1, P_4 = \rho g h_2$. При этом $P_1 = P_{атм} + P_3, P_2 = P_{атм} + P_4$. Подставляя (15) в (13) и логарифмируя, находим:

$$\begin{aligned} \gamma &= \frac{\ln\left(\frac{P_1}{P_{атм}}\right)}{\ln\left(\frac{P_1}{P_2}\right)} = \frac{\ln\left(\frac{(P_{атм} + P_3)/P_{атм}}{(P_{атм} + P_4)/P_{атм}}\right)}{\ln\left(\frac{(P_{атм} + P_3)/(P_{атм} + P_4)}{(P_{атм} + P_4)/P_{атм}}\right)} = \\ &= \frac{\ln\left(1 + \frac{P_3}{P_{атм}}\right)}{\ln\left(\frac{(1 + \frac{P_3}{P_{атм}})/(1 + \frac{P_4}{P_{атм}})}{(1 + \frac{P_4}{P_{атм}})}\right)} \approx \frac{\ln\left(1 + \frac{P_3}{P_{атм}}\right)}{\ln\left(1 + \frac{(P_3 - P_4)}{P_{атм}}\right)}. \end{aligned} \quad (16)$$

Здесь введены обозначения $P_3 = \rho gh_1, P_4 = \rho gh_2$. В последнем приближенном равенстве в (16) учтено известное в математике представление $\frac{1}{1+x} \approx 1-x$, справедливое при $|x| \ll 1$, где $x = \frac{P_4}{P_{атм}}$, а также пренебрегается малым (по сравнению с остальными) слагаемым $\frac{P_3 P_4}{P_{атм}}$. Далее учитываем применительно к числителю и знаменателю последнего выражения в формуле (16) известное соотношение $\ln(1+\alpha) \approx \alpha$, справедливое при условии $|\alpha| \ll 1$ (действительно, в условиях эксперимента не только $|x| \ll 1$, но и $|\alpha| \ll 1$). В результате получим окончательное расчетное выражение для определения искомого значения γ :

$$\gamma = \frac{\frac{P_3}{P_{атм}}}{\frac{(P_3 - P_4)}{P_{атм}}} = \frac{P_3}{P_3 - P_4} = \frac{h_1}{h_1 - h_2}. \quad (17)$$

III. Расчет погрешности найденного значения γ

Расчет абсолютной погрешности найденного значения γ можем провести по формуле, совпадающей с формулой расчета погрешности в случае прямых измерений. Это связано с тем, что число проведенных экспериментов (а именно 10) много больше единицы. В этом случае абсолютная погрешность γ вычисляется по формуле

$$\Delta\gamma = \sqrt{\frac{(\gamma_1 - \langle \gamma \rangle)^2 + (\gamma_2 - \langle \gamma \rangle)^2 + \dots + (\gamma_n - \langle \gamma \rangle)^2}{n(n-1)}} t_\alpha.$$

Здесь $n=10$, среднее значение $\langle \gamma \rangle = \frac{\gamma_1 + \gamma_2 + \dots + \gamma_n}{n}$, t_α - коэффициент

Стьюдента, соответствующий числу опытов $n=10$ и выбранному значению доверительной вероятности, которое принимаем равным $\alpha = 0.90$ или $\alpha = 0.95$ (см. методическое пособие «Обработка результатов физического эксперимента»).

Относительная погрешность равна $\delta\gamma = \frac{\Delta\gamma}{\langle \gamma \rangle} \cdot 100\%$.

Расчет абсолютной погрешности значения γ можно провести и по методу, отвечающему косвенным измерениям (см. методическое пособие «Обработка результатов физического эксперимента»):

$$\Delta\gamma = \left| \frac{\partial\gamma}{\partial h_1} \right| \Delta h_1 + \left| \frac{\partial\gamma}{\partial(h_1 - h_2)} \right| (\Delta h_1 + \Delta h_2) \quad (18)$$

и далее сравнить полученные результаты.

На основе изложенных рассуждений в работе определяется коэффициент адиабаты γ (см. Первый способ измерения). Однако трудность состоит в том, что адиабатный процесс занимает малые доли секунды, а момент его завершения, когда требуется закрыть клапан, неизвестен.

Поэтому P'' определяется следующим косвенным методом. При одинаковом начальном давлении P' , но разной длительности t открытия крана (3), соединяющего сосуд с атмосферой, измеряют конечное давление $P_{4\kappa}(t)$. Закономерности теплообмена между газом и окружающей средой таковы, что зависимость $P_{4\kappa}(t)$ можно приближенно описать экспоненциальной функцией вида

$$P_{4\kappa}(t) = P_4 \exp\left(-\frac{t-\tau}{\alpha}\right),$$

где τ — длительность адиабатного процесса, α — постоянный коэффициент, характеризующий скорость теплообмена. Пренебрегая τ по сравнению с t и логарифмируя обе части последнего равенства, приходим к выражению:

$$\ln P_{4\kappa}(t) = \ln P_4 - \frac{t}{\alpha} \quad (19)$$

Поскольку $P_{4\kappa}(t) = h_2(t)\rho_{\text{воды}}g$, $P_{4\kappa}(0) = h_2(0)\rho_{\text{воды}}g$, то с учетом свойств логарифма получаем:

$$\ln h_2(t) = \ln h_2(0) - \frac{t}{\alpha}$$

Так как $\ln h_2(t)$ линейно зависит от времени, и при $t \rightarrow 0$ стремится к $\ln h_2(0)$, то точка пересечения экспериментально

найденного линейного графика с вертикальной линией при $t=0$

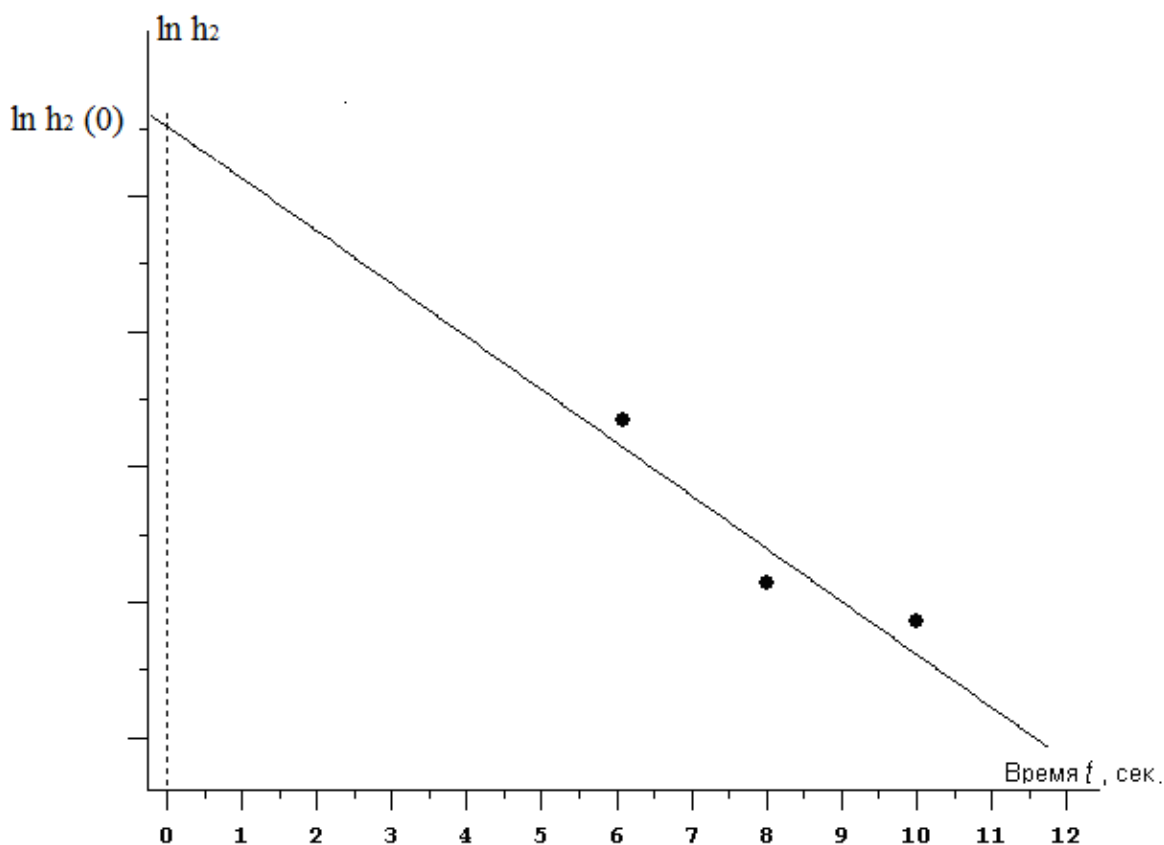


Рис. 5

позволяет найти $\ln h_2(0)$ и определить $h_2(0)$

IV. Выполнение работы

I. Первый способ измерения

1. Открыть кран и накачать воздух в сосуд так, чтобы разность уровней в коленах манометра достигла $15 \div 20$ см.

2. Закрывать кран и после того, как давление в сосуде установится, произвести отсчет разности уровней высот h_1 уровней жидкости в коленах манометра.

3. Открыть кран, на короткое время соединяя сосуд с атмосферой. Как только уровни в коленах манометра сравняются, кран быстро закрыть.

4. Когда произойдет теплообмен с окружающей средой и давление установится, измерить разность значений h_1 и h_2 в коленах манометра.

5. Измерения по пп. 1 повторить **10 раз**, беря разные значения h_1 . Результаты измерений значений h_1 и h_2 занести в таблицу.

№ опыта	h_1	h_2	γ	$\langle \gamma \rangle$

6. Вычислить по формуле (17) значения γ для каждого измерения, найти среднее арифметическое значение $\langle \gamma \rangle$.

7. Определить абсолютную $\Delta\gamma$ и относительную $\delta\gamma$ ошибку значений γ (см. методическое пособие «Обработка результатов измерений»).

8. По формуле (9) подсчитать значения γ для основных газов, из которых состоит воздух (азот, кислород, аргон, углекислый газ, пары воды).

9. Сравнить $\langle \gamma \rangle$ со значением n для политропного процесса (11).

II. Второй способ измерения.

1. Открыть кран и накачать воздух в сосуд так, чтобы разность уровней h_1 в коленах манометра достигла уровня 21 см. Затем кран закрыть.

2. Дождаться, когда температура в сосуде станет равна комнатной, признаком чего станет прекращение изменения положения уровней жидкости в коленах манометра. При всех опытах стремиться к тому, чтобы соответствующая разность уровней в коленах манометра была бы одинаковой. Если это не выполняется, необходимо немного подкачать воздух или, напротив, слегка его выпустить с тем, чтобы величина h_1 во всех опытах была бы одинаковой.

3. Открыть кран соединения с атмосферой и закрыть его через требуемое время. Рекомендуемые значения t : 6 сек; 8 сек; 10 сек. Прошедшее время измеряется секундомером. Занести реальное время t , в течение которого был открыт клапан, в таблицу.

№ опыта	h_1	t	$\ln h_2(t)$

4. Дождаться, когда температура в баллоне сравняется с температурой в лаборатории. Занести в таблицу значение $\ln h_2(t)$.

5. По полученным данным построить график зависимости $\ln h_2(t)$ и графически вычислить значение $\ln(h_2(0))$ (см. рис. 5). После чего, полагая в формуле (17) $h_2 = h_2(0)$, найти искомое значение γ .

6. Сравните найденные способами (I) и (II) значения γ . Сделайте вывод.

Контрольные вопросы

1. Физическая модель идеального газа. Уравнение состояния идеального газа.
2. Молярная, удельная и полная теплоемкости.
3. В каких единицах измеряются в системе СИ давление, объем, температура, молярные теплоемкости?
4. Что такое молярные теплоемкости C_p и C_v ?
5. Что такое адиабатный процесс?
6. Что такое изотермический процесс?
7. Что такое изобарный процесс?
8. Что такое изохорный процесс?
9. Понятие политропного процесса.
10. Вывод расчетной формулы для определения γ .
11. Изобразите в координатах $P-V$ изохорное охлаждение, изобарное нагревание, изотермическое и адиабатическое расширение, начинающиеся из одного начального состояния.
12. Как найти бесконечно малое изменение внутренней энергии и бесконечно малую работу, совершаемую идеальным газом в некотором термодинамическом процессе?
13. Как связаны молярные теплоемкости C_p и C_v с

числом степеней свободы молекулы i ? Каково теоретическое значение γ ?

14. Что такое уравнение Пуассона?

15. Как изменяется давление некоторого количества воздуха при адиабатном увеличении его объема в два раза?

16. Выведите формулу (18) для расчета $\Delta\gamma$.

17. Решите задачи № 5. 187, 5.158, 5.160. из «Сборника задач по общему курсу физики» (Волькенштейн В.С. Изд. «Книжный мир». СПб. 2003.)

ЛИТЕРАТУРА

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т.1. § 15. Изд. «Лань». СПб. 2005
2. Яворский Б. М., Пинский А. А. Основы физики, т. I. М.: Наука, 1974. 496 с.
3. Волькенштейн В.С. Сборник задач по общему курсу физики. М.: Наука, 2003. 220 с.
4. Яворский Б. М., Детлаф А. А. Справочник по физике, М.: Наука, 1964. 847 с.

Лев Петрович Коган

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ ТЕПЛОЕМКОСТЕЙ ВОЗДУХА

Методические указания к выполнению лабораторной работы № 4 для студентов специальностей 271101, 230400.62, 120700.62, 270800.62, 221700.62, 022000.62

Подписано в печать _____. Формат 60 x 90. 1/16. Бумага газетная. Печать трафаретная. Уч. изд. л. _____. Усл. печ. л. _____. Тираж 150 экз. Заказ № _____

Федеральное агентство по образованию.

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Нижегородский государственный строительный университет»
603950, Н. Новгород, Ильинская, 65.

Полиграфцентр ННГАСУ, 603950 Н.Новгород, Ильинская, 65.