

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АРХИТЕКТУРНО-
СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

Кафедра физики, электротехники и автоматики

методические указания к лабораторным работам по физике
для бакалавров всех направлений подготовки

Лабораторная работа № 16

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ ТЕПЛОЕМКОСТЕЙ
ГАЗОВ ПРИ ПОСТОЯННОМ ДАВЛЕНИИ И ОБЪЕМЕ**

Казань
2023

УДК 535
ББК 23.343
Ф47

Ф47 Методические указания к лабораторным работам по физике для бакалавров всех направлений подготовки. Лабораторная работа № 16. Определение отношения теплоемкостей газов при постоянном давлении и объеме / Сост.: В. Л. Фурер. Казань: Изд-во Казанск. гос. архитектур.-строит. ун-та, 2023.- 11 с.

Печатается по решению Редакционно-издательского совета Казанского государственного архитектурно-строительного университета

В работе рассмотрен первый закон термодинамики и тепломкости газов. Приводится описание экспериментальной установки, на которой проводятся измерения отношения теплоемкостей газов.

Илл. 2, табл. 1

Рецензент
Доцент кафедры химии и инженерной экологии в строительстве
Н.С. Громаков

УДК 535
ББК 23.343

© Казанский государственный
архитектурно-строительный
университет, 2023.

© Фурер В.Л., 2023.

Данная лабораторная работа относится к разделу физики «Термодинамика», который рассматривает свойства термодинамических систем.

Термодинамической системой называют совокупность большого числа атомов или молекул, находящихся в тепловом движении и взаимодействующих между собой. Такими системами являются газы, жидкости и твердые тела. Состояние термодинамической системы характеризуется параметрами состояния. В качестве таких параметров обычно используют температуру, объем и давление.

Рассмотрим простейшую термодинамическую систему — идеальный газ. *Идеальным называют газ, в котором размеры молекул исчезающе малы, силы притяжения между молекулами отсутствуют, столкновения молекул между собой и со стенками сосуда упругие.* Реальные газы при малых давлениях и не слишком низких температурах в достаточно хорошем приближении можно рассматривать как идеальные.

Параметры идеального газа связаны друг с другом с помощью уравнения Менделеева-Клапейрона:

$$PV = \frac{M}{\mu} RT, \quad (1)$$

где M – масса газа, μ – молярная масса (масса одного моля газа), R – универсальная газовая постоянная.

Числом степеней свободы i молекул называют число независимых механических движений, в которых они могут участвовать. Например, атом может двигаться относительно трех координатных осей X , Y и Z , и поэтому он обладает тремя степенями свободы поступательного движения ($i = 3$); жесткая двухатомная молекула может двигаться поступательно и вращаться относительно двух осей. Следовательно, она обладает пятью степенями свободы ($i = 5$).

Внутренней энергией термодинамической системы называют сумму кинетической энергии поступательного, вращательного и колебательного движений молекул и атомов и потенциальной энергии их взаимодействия. В идеальном газе притяжение между молекулами отсутствует. Поэтому их потенциальная энергия равна нулю. Тогда внутренняя энергия этого газа будет складываться из кинетических энергий отдельных молекул. Внутренняя энергия идеального газа вычисляется по формуле

$$U = \frac{M}{\mu} \frac{i}{2} RT. \quad (2)$$

Таким образом, внутренняя энергия данной массы идеального газа зависит только от температуры и не зависит от объема и давления.

Процесс передачи энергии от одного тела к другому без совершения механической работы называется теплопередачей или теплообменом. Количество теплоты – это энергия, переданная путем теплообмена от одной термодинамической системы к другой вследствие разницы температур этих систем.

Закон сохранения и превращения энергии применительно к тепловым процессам называется первым законом термодинамики. *Первый закон термодинамики утверждает: количество теплоты, сообщенное системе, расходуется на изменение ее внутренней энергии и на совершение механической работы при ее расширении:*

$$dQ = dU + dA. \quad (3)$$

Определим выражение работы dA при расширении газа, находящегося под поршнем в цилиндре (рис. 1).

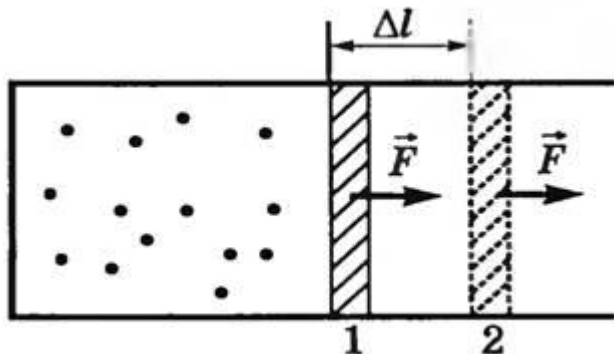


Рис. 1

Если при нагревании газ расширяется, и поршень под действием силы сдвигается на расстояние dl , то работа равна $dA = F \cdot dl = P \cdot S \cdot dl$ или

$$dA = P \cdot dV, \quad (4)$$

где $P = \frac{F}{S}$ – давление газа; S – площадь поршня; $dV = S \cdot dl$ – приращение объема.

Рассмотрим первый закон термодинамики для различных процессов.

1. Изохорический процесс. *Изохорическим называется процесс, происходящий при постоянном объеме ($V = \text{const}$). Это означает, что $dV = 0$ и элементарная работа $dA = p \cdot dV = 0$. Поэтому, для изохорического процесса работа не совершается и все сообщаемое газу тепло идет на увеличение его внутренней энергии.*

$$dQ = dU \quad (5)$$

Теплоемкостью C называется физическая величина, численно равная количеству теплоты, необходимому для нагревания системы на один градус

$$C = \frac{dQ}{dT}. \quad (6)$$

Количество теплоты, необходимое для нагревания системы, зависит от массы вещества. Поэтому вводят понятие удельной и молярной теплоемкости. *Удельная теплоёмкость численно равна количеству теплоты, необходимому для нагревания единицы массы вещества на один градус. Моляр-*

ная теплоёмкость C_μ численно равна количеству теплоты, необходимому для нагревания одного моля вещества на один градус. Между двумя типами теплоёмкости существует взаимосвязь

$$C_\mu = \mu c.$$

Теплоемкость газов зависит от условий нагревания. Различают теплоемкости при постоянном давлении C_p и при постоянном объеме C_v . С учетом уравнения (5), получим молярную теплоемкость при постоянном объеме:

$$C_{\mu V} = \frac{dU}{dT}. \quad (7)$$

2. Изобарический процесс — процесс, происходящий при постоянном давлении. Первый закон термодинамики для изобарического процесса в дифференциальной форме, учитывая (4), запишется в виде

$$dQ = dU + P \cdot dV. \quad (8)$$

Уравнение (6) для изобарического процесса с учетом (7) запишется:

$$C_{\mu P} = C_{\mu V} + P \cdot \frac{dV}{dT} \quad (9)$$

Величина $C_{\mu P}$ называется молярной теплоемкостью газа при постоянном давлении. Для одного моля газа ($M = \mu$) уравнение (1) запишется в виде:

$$P \cdot V = R \cdot T$$

Продифференцируем обе части этого равенства по T , с учетом того, что $P = const$ и $dP = 0$. Тогда

$$P \cdot \frac{dV}{dT} = R.$$

Подставляя это в (8), находим выражение, называемое *уравнением Майера*,

$$C_{\mu P} = C_{\mu V} + R \quad (10)$$

Отметим, что уравнение Майера справедливо только для молярных теплоемкостей.

Из (9) следует, что $C_{\mu P} > C_{\mu V}$. Это объясняется следующим образом. Из первого закона термодинамики следует, что при изобарическом процессе теплота, сообщенная газу, идет не только на нагревание газа, но и на совершение газом работы при его расширении. При постоянном же объеме газ не расширяется, работы не совершает и все подводимое газу тепло идет только на его нагревание. Следовательно, чтобы нагреть газ на один градус

при постоянном давлении потребуется большее количество теплоты, чем при постоянном объеме. В силу этого теплоемкость C_p при постоянном давлении больше, чем теплоемкость C_v при постоянном объеме.

Необходимо отметить, что для твердых и жидких тел, вследствие их малого теплового расширения, теплоемкости C_p и C_v практически равны.

3. Изотермический процесс. Процесс, протекающий при постоянной температуре, называется изотермическим. Так как $T = \text{const}$, то $dU = 0$ и

$$dQ = dA, \quad (11)$$

т.е. внутренняя энергия газа остается постоянной, и все подводимое тепло идет на выполнение работы.

4. Адиабатический процесс. Процесс называется адиабатическим, если он протекает без теплообмена с окружающей средой ($dQ = 0$). Для такого процесса первый закон термодинамики имеет вид:

$$dA = -dU = -C \cdot dT, \quad (12)$$

т.е. работа совершается газом только за счет изменения внутренней энергии. Отсюда $P \cdot dV = -C \cdot dT$. Поэтому при адиабатическом расширении температура газа понижается, а при сжатии – повышается. Адиабатический процесс описывается уравнением Пуассона:

$$P \cdot V^\gamma = \text{const}, \quad (13)$$

где $\gamma = C_p/C_v$ — показатель адиабаты или коэффициент Пуассона.

С точки зрения молекулярно-кинетической теории теплоемкость газа зависит от числа степеней свободы молекул газа.

Молярная теплоемкость газа $C_{\mu V}$ при постоянном объеме находится по формуле:

$$C_{\mu V} = \frac{i}{2} \cdot R. \quad (14)$$

Молярная теплоемкость газа $C_{\mu P}$ при постоянном давлении равна

$$C_{\mu P} = C_{\mu V} + R = \frac{i+2}{2} \cdot R \quad (15)$$

Из (14) и (15) следует, что отношение γ теплоемкостей при постоянном давлении и объеме равно

$$\gamma = \frac{i+2}{i}. \quad (16)$$

Следует подчеркнуть, что, согласно классической теории, газы, независимо от их природы, должны обладать одинаковыми теплоемкостями, если число степеней свободы их молекул одинаково. Учитывая, что воздух состоит в основном из двухатомных газов (кислород, азот), можно подсчитать теоретическое значение γ .

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

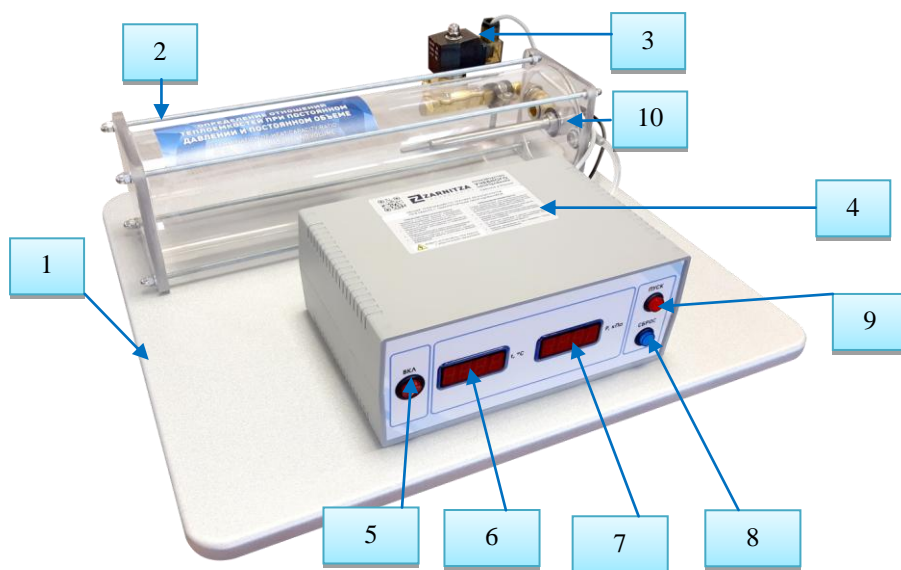


Рис 2

1 – основание; 2 – колба; 3 – электромагнитный клапан; 4 – измерительный модуль; 5 – кнопка включения питания «СЕТЬ»; 6 – измеритель температуры; 7 – измеритель давления; 8 – кнопка включения электромагнитного спускного клапана «СБРОС»; 9 – кнопка включения компрессора «ПУСК»; 10 – датчик температуры.

Состав лабораторной установки показан на рис. 2. К колбе (2) прикреплен электромагнитный клапан (3) и датчик температуры (10). Давление в колбе нагнетается компрессором, установленным в измерительном модуле (4), по пневматическому шлангу. Измерение давления в системе осуществляется датчиком давления установленным в измерительном модуле (4). С помощью клапана сосуд соединяется с атмосферой.

На лицевой панели измерительного модуля (4) расположены следующие элементы управления, коммутации и индикации:

- кнопка включения питания «СЕТЬ» (5);
- кнопка включения компрессора «ПУСК» (9);

- кнопка сброса давления «СБРОС» (8);
- измеритель давления в колбе «P, кПа» (7);
- измеритель температуры в колбе «t, °C» (6).

Если накачать в сосуд немного воздуха, то давление и температура воздуха в сосуде повысятся. Затем, вследствие передачи тепла через стенки сосуда, температура воздуха в сосуде понизится до комнатной, а давление P в сосуде станет равным $P = P_0 + P_1$, где P_0 — атмосферное давление, а P_1 — избыточное давление, измеряемое модулем.

Откроем клапан на очень короткое время. В этом случае давление внутри сосуда станет равным атмосферному. Вследствие кратковременности процесса расширение воздуха в сосуде можно считать адиабатическим, так как приток тепла в сосуд через его стенки очень мал. Адиабатическое же расширение воздуха приводит к его охлаждению. Затем воздух в сосуде начинает нагреваться до комнатной температуры за счет получения тепла через его стенки. Это приводит к тому, что давление воздуха в сосуде увеличивается и становится равным $P_0 + P_2$, где P_2 — избыточное давление в сосуде.

Можно показать, что отношение γ теплоемкостей при постоянном давлении и объеме связано с избыточными давлениями P_1 и P_2 соотношением

$$\gamma = \frac{P_1}{P_1 - P_2} . \quad (17)$$

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ

1. Подключить измерительный модуль к сети переменного тока 220 В 50 Гц.

2. Перевести клавишный выключатель «СЕТЬ» на измерительном модуле в положение «ВКЛ.», при этом на индикаторах высветятся значения давления в колбе и температура воздуха в колбе. Индикатор давления указывает избыточное давление сверх атмосферного.

3. Удерживая кнопку «ПУСК» включения компрессора установить необходимое давление в колбе (18 - 35 КПа). При достижении необходимого давления в колбе отпустить кнопку.

4. Набрав давление, необходимо дождаться установления равновесия, при этом вначале давление будет снижаться за счет охлаждения. При установлении равновесия давление будет оставаться практически постоянным в течение 10 – 15 секунд. Записать показания давления по прибору (P_1).

5. Нажать кнопку «СБРОС» электромагнитного клапана (будет слышен характерный щелчок и звук стравливаемого воздуха) и удерживать ее в течение 1-2 секунды.

6. Отпустить кнопку «СБРОС».

7. Выждать одну-две минуты.

8. Записать максимальное значение показания давления (P_2).

9. Занести значения P_1 и P_2 в таблицу 1. Опыт повторить не менее 5 раз и вычислить значения γ_n по формуле (18).

10. Подсчитать среднее значение γ_{cp} .

11. Учитывая, что воздух состоит в основном из двухатомных газов, подсчитать теоретическое значение по формуле (16).

Таблица 1

№	P_1	P_2	γ_n	γ_{cp}
1				
2				
3				
4				
5				

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое термодинамическая система и параметры состояния?
2. Какой газ называется идеальным?
3. Запишите уравнение Менделеева-Клапейрона. В чем смысл этого уравнения?
4. Сформулируйте первый закон термодинамики.
5. Запишите выражение работы при расширении газа, находящегося под поршнем.
6. Запишите первый закон термодинамики для изопрцессов.
7. Для какого процесса внутренняя энергия газа остается постоянной?
8. Дайте определения теплоемкости, удельной и молярной теплоемкости.
9. Почему теплоемкость газа при постоянном давлении больше теплоемкости газа при постоянном объеме?
10. Дайте определение адиабатического процесса. Запишите уравнение Пуассона.
11. Как меняется температура газа при адиабатическом процессе?

12. Что называется числом степеней свободы? Чему оно равно для двухатомного газа?
13. Чему равен коэффициент Пуассона для двухатомного газа?

Методические указания к лабораторным работам по физике
для бакалавров всех направлений подготовки

Лабораторная работа № 16

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ ТЕПЛОЕМКОСТЕЙ ГАЗОВ ПРИ ПОСТОЯННОМ ДАВЛЕНИИ И ОБЪЕМЕ

Составитель: Фурер Виктор Львович

Редактор Л.З. Ханафиева

Издательство

Казанского государственного архитектурно-строительного университета		
Подписано в печать 05.10.23		Формат 60-84/16
Заказ № 281	Печать ризографическая	Усл.-печ. л. 0,7
Тираж 50 экз.	Бумага офсетная № 1	Уч. - изд. л. 0,7

Отпечатано в полиграфическом секторе
Издательство КГАСУ
420043, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1
