

**Е.В. Иванова, В.В. Горлач, Н.А.Иванов**

**РУКОВОДСТВО  
К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ  
ПО ФИЗИКЕ  
(Молекулярная физика и термодинамика)**



УДК 531  
ББК 22.2  
Р 84

*Рецензенты:*

д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой физики ОмГТУ, В.И. Суриков;  
канд. физ.-мат. наук, доц., зав. кафедрой высшей математики СибАДИ, Л.Н. Романова

Работа одобрена редакционно-издательским советом академии в качестве руководства к лабораторным работам для студентов всех специальностей.

**Руководство к лабораторным работам по физике (Молекулярная физика и термодинамика)** /Е.В. Иванова, В.В. Горлач, Н.А. Иванов; Под ред. Е.В. Ивановой: Учебно-методическое пособие.–Омск: Изд-во СибАДИ, 2009.–48 с.

ISBN 978-5-93204-453-7

Руководство содержит теоретический материал и методику выполнения лабораторных работ по молекулярной физике и термодинамике, а также различные приложения.

Руководство написано в соответствии с программой по физическому практикуму и настоящим состоянием лабораторий кафедры физики СибАДИ.

Может быть использовано при подготовке и выполнении лабораторного работ студентами очной и заочной форм обучения по всем специальностям.

Табл. 8. Ил. 7. Библиогр.: 8 назв.

ISBN 978-5-93204-453-7

© Е.В. Иванова, В.В. Горлач,  
Н.А. Иванов, 2009

Федеральное агентство по образованию  
Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия  
(СибАДИ)

Е.В. Иванова, В.В. Горлач, Н.А. Иванов

РУКОВОДСТВО  
к лабораторным занятиям по физике  
(Молекулярная физика и термодинамика)

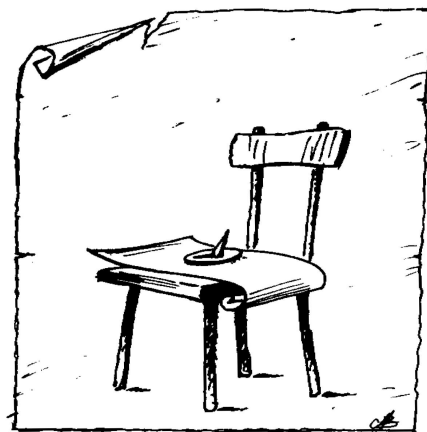
Учебно-методическое пособие

Под редакцией Е.В. Ивановой

Омск  
Издательство СибАДИ  
2009

## Оглавление

Введение.....	3
<i>Лабораторная работа № 6.</i> Определение молярной газовой постоянной и скорости движения молекул.....	5
<i>Лабораторная работа № 7.</i> Определение коэффициента Пуассона методом адиабатического расширения.....	11
<i>Лабораторная работа № 8.</i> Определение энтропии при изохорном охлаждении воздуха.....	19
<i>Лабораторная работа № 9.</i> Изучение термодинамического цикла. Определение КПД теплового двигателя.....	25
<i>Лабораторная работа № 10.</i> Измерение динамической вязкости жидкости методом Стокса.....	32
Обработка результатов физических измерений.....	37
Приложение.....	42
Библиографический список.....	46



## Введение

Одна из основных задач изучения физики состоит в овладении методами экспериментального исследования физических процессов и явлений. Для решения этой задачи в высших учебных заведениях в рамках дисциплины «Физика» проводится лабораторный физический практикум, главная цель которого – дать студентам возможность подробнее ознакомиться с физическими явлениями и с наиболее важными физическими законами, овладеть основными методами физических измерений.

Выполнение каждой лабораторной работы, входящей в практикум, проводят по рекомендуемой ниже схеме.

☑ Теоретическая подготовка должна проводиться заранее, поэтому необходимо самостоятельно изучить описание лабораторной работы. Теоретическая часть лабораторной работы, как правило, приводится в сжатом варианте, где обращается внимание на наиболее важные положения и законы, поэтому рекомендуется помимо описания лабораторной работы ознакомиться с рассматриваемыми явлениями и законами в учебниках и учебных пособиях по физике. В каждой лабораторной работе приведен перечень рекомендуемых источников с указанием соответствующих параграфов.

☑ После предварительной теоретической подготовки необходимо ознакомиться с методикой выполнения данной работы, а также приборами и принадлежностями, которые используются при выполнении эксперимента. Следует выяснить: как непосредственно проводится эксперимент, какие величины измеряются? Необходимо заготовить таблицу для записи результатов измерений. В каждой лабораторной работе проводится несколько опытов.

☑ При выполнении лабораторной работы следует придерживаться общих правил:

- выяснив, какие физические законы положены в основу работы установки, обратить внимание на упрощающие предположения, с учетом которых спланирован эксперимент;

- перед началом измерений полезно попрактиковаться в выполнении той или иной операции;

- при проведении однократных измерений следует хотя бы раз повторить опыт, что позволит оценить правильность выполнения опыта и избежать грубых ошибок;








- все результаты следует немедленно записывать без какой-либо обработки в таблицу для результатов измерений. Не пользуйтесь черновиками, так как переписывание является источником дополнительных ошибок;

- в конспекте лабораторной работы четко указывайте смысл буквенных обозначений всех используемых величин. Не забывайте указывать их единицы измерения.

☑ Следующий этап лабораторной работы – это обработка результатов измерений, целью которой является определение значения физической величины и вычисление погрешности проведенных измерений. Иногда помимо математической обработки рекомендуется приводить соответствующую графическую интерпретацию рассматриваемого явления или закона.

☑ Завершающий этап лабораторной работы – это формулирование общих выводов по работе.

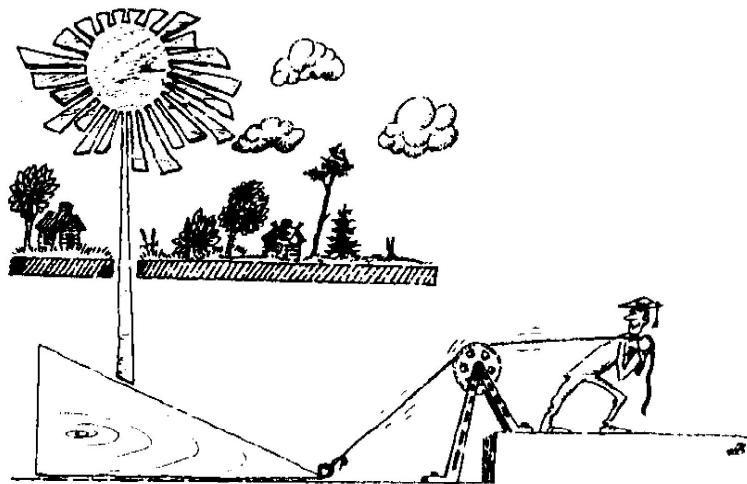
Каждая лабораторная работа имеет следующие разделы:

-  – основы теории;
-  – методика выполнения эксперимента и описание установки;
-  – вывод рабочей формулы;
-  – выполнение работы;
-  – обработка результатов измерений;
-  – контрольные вопросы;
-  – библиографический список.

*Авторы данного пособия выражают глубокую признательность и благодарность всем преподавателям кафедры физики СибАДИ за ценные указания и рекомендации, которые были даны при подготовке к изданию этого учебно-методического пособия.*

## Библиографический список

1. Трофимова Т.И. Курс физики: Учебное пособие для вузов.-М.:Изд. центр «Академия», 2007.-560 с.
2. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики: Учебное пособие для вузов.-М.:Высшая школа, 1989.-608 с.
3. Савельев И.В. Курс общей физики: Учебное пособие для вузов: В 5 кн. Кн. 3. Молекулярная физика и термодинамика.-М.: Наука; Физматлит, 1998.-208 с.
4. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике.-М.:Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1990.-624 с.
5. Бондарь Б.В., Калашиников Н.П., Спирин Г.Г. Курс общей физики: Учебное пособие для вузов: В 3 т. -М.:Высш. школа, 2005.-Т.3.-366 с.
6. Бондарь Б.В., Калашиников Н.П., Спирин Г.Г. Курс общей физики: Учебное пособие для вузов: В 3 т.-М.:Высш. школа, 2005.-Т.1.-352 с.
7. Калашиников Н.П., Смондырев М.А. Основы физики: Учебник для вузов: В 2 т.-М.:Изд-во «Дрофа», 2003.-Т.1.-398 с.
8. Обработка, представление, интерпретация результатов измерений: Учебное пособие/ В.В. Горлач, В.Л. Егоров, Н.А. Иванов; Под. ред. В.В. Горлача.-Омск: Изд-во СибАДИ, 2006.-83 с.



## Лабораторная работа № 6

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОЛЯРНОЙ ГАЗОВОЙ ПОСТОЯННОЙ И СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ МОЛЕКУЛ

Цель работы: определить молярную газовую постоянную и среднеквадратичную скорость молекул воздуха методом откачки.

Приборы и принадлежности: стеклянная колба с резиновым шлангом, насос Комовского, вакуумметр, электронные весы, термометр.



#### Основы теории

**Модель идеального газа.** Идеальный газ – это газ, взаимодействие между молекулами которого пренебрежимо мало. На практике такое состояние достигается при малых плотностях газа. Всякий реальный газ при достаточном разрежении близок по своим свойствам к идеальному. Некоторые газы, такие, как воздух, азот, кислород, даже при обычных условиях, т.е. комнатной температуре и невысоком давлении ( $\approx 0,1$  МПа), мало отличаются от идеального газа. Поэтому в работе исследуемый газ (воздух) можно считать идеальным.

**Молярная газовая постоянная.** Газообразные вещества при небольших плотностях и достаточно высоких температурах (когда их поведение описывается на основе модели идеального газа) подчиняются уравнению Клапейрона

$$\frac{pV}{T} = \text{const}, \quad (1)$$

где  $p$  – давление;  $V$  – объем;  $T$  – термодинамическая температура газа.

Согласно закону Авогадро при нормальных условиях ( $p_n = 101,3$  кПа и  $T_n = 273,15$  К) объем 1 моля любого газа равен  $V_m = 22,4$  л/моль. Отсюда следует, что в случае, когда количество газа  $\nu$  равно 1 молю, численное значение зависимости в уравнении (1) будет одинаковым для всех газов. Эту величину обозначают буквой  $R$  и называют молярной газовой постоянной (или универсальной газовой постоянной). Тогда



$$R = \frac{p_n V_m}{T_n} = \frac{101,3 \cdot 10^3 \text{ Па} \cdot 22,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 / \text{МОЛЬ}}{273,15 \text{ К}} = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}.$$

Приняв во внимание, что при одинаковых давлении и температуре некоторое число  $\nu$  молей газа будут занимать в  $\nu$  раз больший объем, чем для 1 моля ( $V = \nu V_m$ ), перепишем уравнение (1) в следующем виде:

$$pV = \nu RT, \quad (2)$$

или с учетом  $\nu = \frac{m}{M}$  (где  $m$  – масса газа;  $M$  – молярная масса газа)

$$pV = \frac{m}{M} RT. \quad (2a)$$

Уравнение (2) называется уравнением Клапейрона-Менделеева.

Если газ изобарно нагревать ( $p = \text{const}$ ), то, расширяясь, он совершает работу

$$A = p\Delta V. \quad (3)$$

С учетом (2) получаем

$$p\Delta V = \nu R\Delta T,$$

т.е.

$$A = \nu R\Delta T. \quad (3a)$$

Выразив  $R$  из уравнения (3), сформулируем физический смысл этой величины:

$$R = \frac{A}{\nu\Delta T}.$$

*Молярная газовая постоянная показывает, какая работа совершается газом при изобарном нагревании на  $\Delta T = 1 \text{ К}$  идеального газа в количестве  $\nu = 1$  моль.*

☐ Пусть в начальный момент в сосуде объемом  $V$  при температуре  $T$  и давлении  $p_1$  (атмосферное давление) находится воздух массой  $m_1$ . Затем путем откачки воздуха при той же  $T$  уменьшим массу  $m_1$  до  $m_2$ . Давление в колбе станет  $p_2$ .

Запишем уравнение (2a) для двух состояний газа:

$$p_1 V = \frac{m_1}{M} RT;$$

$$p_2 V = \frac{m_2}{M} RT.$$

Путем несложных преобразований получим рабочую формулу для вычисления молярной газовой постоянной:

$$R = \frac{MV(p_1 - p_2)}{(m_1 - m_2)T} = \frac{MVp}{mT}, \quad (4)$$

где  $m = m_1 - m_2$  – масса откачанного газа;  $p = p_1 - p_2$  – разность давлений газа в сосуде.

**Средняя квадратичная скорость.** Давление, оказываемое газом на стенки сосуда, обусловлено тем, что молекулы при своем хаотическом движении сталкиваются не только друг с другом, но и со стенками сосуда. Эти столкновения определяют силу, а следовательно, и давление, испытываемое стенкой со стороны газа. Давление газа будет тем больше, чем больше концентрация молекул и скорость их теплового движения. Это следует из основного уравнения молекулярно-кинетической теории

$$p_0 = \frac{1}{3}nm_0 \langle v^2 \rangle, \quad (5)$$

где  $m_0$  – масса одной молекулы;  $n$  – концентрация молекул (число молекул в единице объема);  $\langle v^2 \rangle$  – среднее значение квадрата скорости молекул.

Как бы не изменялись скорости движения молекул, средняя квадратичная скорость в газе остается постоянной при данной температуре.

☐ Концентрация молекул определяется как отношение числа молекул  $N$  к объему  $V$ :

$$n = \frac{N}{V}.$$

Массу молекул в колбе определим как произведения массы одной молекулы  $m_0$  на число молекул  $N$ :

$$Nm_0 = m.$$

Тогда уравнение (5) преобразуется к следующему виду:

$$p = \frac{1}{3} \frac{m}{V} \langle v^2 \rangle. \quad (5a)$$

Записав уравнение (5a) для двух состояний газа, получим формулу для вычисления средней квадратичной скорости молекул

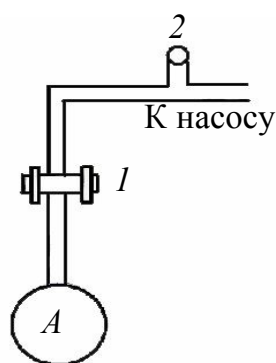
$$\langle v_{кв} \rangle = \sqrt{\frac{3pV}{m}}, \quad (6)$$

где  $m = m_1 - m_2$  – масса откачанного газа;  $p = p_1 - p_2$  – изменение давления газа в сосуде;  $V$  – объем колбы.

## 🔧 Методика выполнения эксперимента и описание установки

Экспериментальная установка (рис.1) состоит из стеклянной колбы  $A$ , соединенной через кран  $1$  с насосом Комовского и вакуумметром  $2$ , с помощью которого измеряют разность давления ( $p_1 - p_2$ ) в сосуде до и после откачки газа.

Температура газа  $T$  равна комнатной и измеряется по термометру в лаборатории.



Массу откачанного газа измеряют на электронных весах как разность масс колбы с воздухом при атмосферном давлении (начальное состояние):

$$m_1^* = m_1 + m_k$$

и после откачки воздуха из колбы (конечное состояние):

$$m_2^* = m_2 + m_k.$$

Масса откачанного газа:

$$m = m_1^* - m_2^* = m_1 - m_2. \quad (7)$$

Рис 1. Схема установки



## Выполнение работы

1. Заготовить таблицу для записи результатов измерений.

№ п/п	$m_1^*$ , кг	$m_2^*$ , кг	$m$ , кг	$V$ , м <sup>3</sup>	$p$ , кгс/см <sup>2</sup>	$p$ , Па	$R_i$ , Дж/мольК	$\langle v_{кв} \rangle$ , м/с

2. Открыть зажим (воздух свободно закачивается в колбу). Измерить массу колбы с воздухом при атмосферном давлении  $m_1^*$ .

3. Соединить колбу через вакуумметр с насосом. Произвести откачку воздуха. При этом вакуумметр показывает разность давлений  $p$  между атмосферным  $p_1$  и давлением в колбе  $p_2$ . По шкале вакуумметра измерить разность давлений.

Шкала вакуумметра проградуирована в  $\frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$ ,  $1 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2} = 98125 \text{ Па}$ .

4. Закрывать кран, отсоединить колбу от вакуумметра. На электронных весах измерить массу колбы  $m_2^*$  после откачки.

5. По термометру определить комнатную температуру  $T$ .

6. Провести 4–5 опытов, для этого следует повторить пп.2–4.



### Обработка результатов измерений

1. По формулам (4) и (6) вычислить  $R_i$  и  $\langle v_{\text{кв}} \rangle$ .

2. Вычислить средние значения  $\langle R \rangle$  и среднеквадратичной скорости.

3. Погрешности  $\Delta M$  и  $\Delta V$  рассчитать как погрешности табличного значения (половина единицы наименьшего разряда числа);  $\Delta m$ ,  $\Delta p$  и  $\Delta T$  рассчитать по цене деления шкалы приборов.

4. Относительная погрешность  $\varepsilon$  косвенного измерения определяется по формуле

$$\varepsilon = \sqrt{\left(\frac{\partial \ln f}{\partial x} \Delta x\right)^2 + \left(\frac{\partial \ln f}{\partial y} \Delta y\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial \ln f}{\partial z} \Delta z\right)^2}. \quad (7)$$

В нашем случае согласно формуле (4)

$$f(x, y, \dots, z) = R = \frac{MVp}{mT}. \quad (4a)$$

Логарифмируем уравнение:

$$\ln R = \ln M + \ln V + \ln p - \ln m - \ln T.$$

Находим частные производные от функции  $\ln R$  по соответствующим переменным:

$$\frac{\partial \ln R}{\partial M} = \frac{1}{M}; \quad \frac{\partial \ln R}{\partial V} = \frac{1}{V}; \quad \frac{\partial \ln R}{\partial p} = \frac{1}{p}; \quad \frac{\partial \ln R}{\partial m} = -\frac{1}{m}; \quad \frac{\partial \ln R}{\partial T} = -\frac{1}{T}.$$

Подставляя полученные значения частных производных в формулу (7), получим уравнение для относительной погрешности  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon = \sqrt{\left(\frac{\Delta M}{M}\right)^2 + \left(\frac{\Delta V}{V}\right)^2 + \left(\frac{\Delta p}{p}\right)^2 + \left(\frac{\Delta m}{m}\right)^2 + \left(\frac{\Delta T}{T}\right)^2}. \quad (8)$$

5. Вычислить значение относительной погрешности  $\varepsilon$  по формуле (8).

6. Вычислить абсолютную погрешность косвенного измерения

$$\Delta R = \varepsilon \langle R \rangle .$$

7. Записать окончательный результат в следующем виде:

$$R = \langle R \rangle \pm \Delta R, \text{ ед. изм.}$$

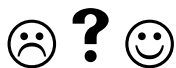
8. Самостоятельно вычислить погрешность в определении  $\langle v_{кв} \rangle$  по методике, рассмотренной в п. 4.

9. Сравните  $\langle v_{кв} \rangle$  с теоретическим значением среднеквадратичной скорости:

$$\langle v_{кв.теор} \rangle = \sqrt{\frac{3RT}{M}}, \quad (9)$$

где  $T$  – температура газа;  $M$  – молярная масса воздуха;  $R=8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{мольК}}$  – молярная газовая постоянная.

10. Сформулируйте общие выводы по работе.



### Контрольные вопросы

1. Сформулируйте основные положения молекулярно-кинетической теории газов.

2. Сформулируйте общие положения модели идеального газа. При каких условиях реальный газ можно считать соответствующим модели идеального газа?

3. Выведите основное уравнение МКТ идеального газа. Объясните физический смысл каждой величины, входящей в уравнение.

4. Сформулируйте физический смысл молярной газовой постоянной.

5. Дайте определение средней квадратичной скорости молекул газа.

6. Приведите вывод рабочей формулы для вычисления  $R$ .

7. Приведите вывод рабочей формулы для вычисления  $\langle v_{кв} \rangle$ .

8. В чем заключается физический смысл давления и температуры с точки зрения молекулярно-кинетической теории?

9. Измерение какой величины вносит наибольшую погрешность при определении молярной газовой постоянной экспериментальным методом, приведенным в данной работе?



### *Библиографический список*

- [1, § 42–43; § 50];
- [2, § 8.4, § 10.1];
- [3, § 1.5, § 2.6];
- [4, § II.1.2– II.1.4, § II.3.3];
- [5, § 3.7, § 4.2–4.3].

## Лабораторная работа № 7

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПУАССОНА МЕТОДОМ АДИАБАТИЧЕСКОГО РАСШИРЕНИЯ

Цели работы: определить показатель адиабаты для воздуха; вычислить работу адиабатического расширения газа.

Приборы и принадлежности: закрытый стеклянный баллон с клапаном, насос, жидкостный манометр.



#### Основы теории

**Виды теплоемкостей.** Теплоемкостью  $C$  тела называется физическая величина, равная отношению количества теплоты  $\delta Q$ , сообщенного телу, к изменению его температуры  $dT$  в рассматриваемом термодинамическом процессе:

$$C_{\text{тела}} = \frac{\delta Q}{dT}, \quad [C_{\text{тела}}] = \frac{\text{Дж}}{\text{К}}.$$

Удельная теплоемкость  $C$  вещества численно равна количеству теплоты, необходимому для нагревания 1 кг вещества на 1 К:

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

где  $m$  – масса вещества.

Молярная теплоемкость вещества численно равна количеству теплоты, необходимому для нагревания 1 моля вещества на 1 К:

$$C_m = \frac{\delta Q}{\nu \cdot dT}, \quad [C_m] = \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}},$$

где  $\nu = \frac{m}{M}$  – количество вещества;  $M$  – молярная масса.

**Степени свободы  $i$**  – это минимальное число независимых координат, с помощью которых можно задать положение системы в пространстве. В ряде задач молекулу одноатомного газа рассматривают как материальную точку, которой приписывают три степени свободы поступательного движения ( $i=i_n=3$ ). Молекула двухатомного газа в классической физике рассматривается как система двух материальных точек, жестко связанных недеформируемой связью. Такая система имеет три поступательных и две вращательных относительно центра масс степени свободы.

Поэтому двухатомный газ обладает пятью степенями свободы ( $i=i_n+i_{ep}=3+2=5$ ). Трехатомная и многоатомная нелинейные молекулы (без упругих связей) имеют шесть степеней свободы ( $i=i_n+i_{ep}=3+3=6$ ). Следует заметить, что жесткой связи между атомами не существует, поэтому для реальных молекул необходимо учитывать и колебательные степени свободы, но при комнатной температуре этими степенями свободы можно пренебречь.

*Адиабатический процесс* – это процесс, происходящий без теплообмена системы с окружающей средой. Первое начало термодинамики для этого процесса записывается следующим образом:

$$A = -\Delta U,$$

т.е. при положительной работе газа (расширении) температура системы будет уменьшаться.

При адиабатическом процессе параметры газа изменяются таким образом, что выполняется следующее уравнение (уравнение Пуассона):

$$pV^\gamma = \text{const}; \quad T^\gamma p^{1-\gamma} = \text{const}; \quad TV^{\gamma-1} = \text{const}. \quad (1)$$

Величина  $\gamma$  называется адиабатической постоянной, или показателем адиабаты. Показатель адиабаты  $\gamma$  равен отношению теплоемкостей при постоянном давлении  $C_p$  и постоянном объеме  $C_V$ :

$$\gamma = \frac{C_p}{C_V}. \quad (2)$$

Для идеального газа, молекула которого имеет  $i$  степеней свободы, молярные теплоемкости  $C_V$  и  $C_p$  определяются следующими уравнениями:

$$C_V = \frac{i}{2}R; \quad (3)$$

$$C_p = \frac{i+2}{2}R. \quad (4)$$

Связь между теплоемкостями  $C_p$  и  $C_V$  установлена Р. Майером:

$$C_p - C_V = R, \quad (5)$$

где  $R$  – молярная газовая постоянная. Из уравнения (5) следует, что  $C_p$  всегда больше  $C_V$ .

**Теоретический показатель адиабаты.** Из уравнений (2), (3) и (4) получаем формулу для определения теоретического  $\gamma_T$ :



$$\gamma_T = \frac{i+2}{i}. \quad (6)$$

Из формулы (6) следует, что отношение молярных теплоемкостей определяется только числом степеней свободы и не зависит от температуры.

Основные компоненты воздуха: азот  $N_2$ —78%, кислород  $O_2$ —21% и некоторые другие газы (из них наибольшую часть составляет аргон Ar). Поэтому с точностью до 1% воздух можно считать двухатомным газом. Для воздуха при комнатной температуре ( $i=5$ )  $\gamma_T = 1,4$ .

В реальных условиях показатель адиабаты для одноатомных газов практически не зависит от температуры, а для воздуха, содержащего двухатомные молекулы, заметно уменьшается при нагревании выше 400 К, т.к. при высоких температурах возбуждаются колебательные степени свободы, и заметная доля подводимой теплоты расходуется на повышение энергии колебательного движения атомов в молекуле.

### ✂ Методика выполнения эксперимента и описание установки

Экспериментальная установка (рис.1) состоит из толстостенного баллона  $B$ , соединенного с нагнетательным насосом и открытым  $U$ -образным водяным манометром  $M$ . Баллон закрыт пробкой, в которую вмонтированы две трубки и быстродействующий клапан  $K$  для выпуска воздуха в атмосферу. Зажим  $\Pi$  служит для предотвращения неконтролируемой утечки газа из баллона через насос (в случае его неисправности). Водяной  $U$ -образный манометр измеряет разность между давлением в баллоне и атмосферным давлением в мм вод. ст.

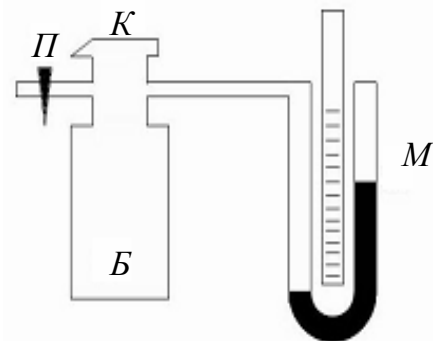


Рис. 1. Схема установки

Рассмотрим процессы, происходящие с газом в баллоне.

1. В начале опыта клапан  $K$  необходимо открыть (для этого нажать на клапан сверху) и в баллоне установится атмосферное давление  $p_0$  и комнатная температура  $T_0$  — точка 1 (рис. 2).

2. При закрытом клапане  $K$  закачиваем насосом воздух в баллон, при этом давление в баллоне увеличивается (см. рис. 2, кривая 1-2), температура повышается, поскольку из-за низкой теплопроводности стенок сосуда теплообмен с окружающей средой не успевает произойти и часть работы, затраченной на сжатие воздуха, идет на изменение внутренней энергии газа. В результате этого газ перейдет в состояние 2 ( $p_2, V_2, T_2$ ), (см. рис. 2).

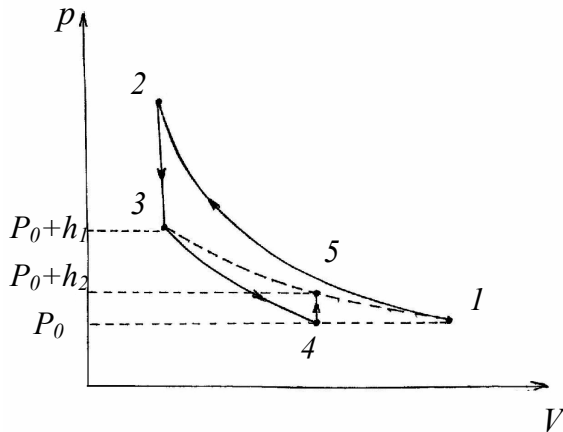


Рис. 2. Процессы в газе

свободного падения.

4. Далее на короткое время открыть клапан  $K$  и сбросить давление в баллоне до атмосферного (см. рис. 2, *адиабатическое расширение*, кривая 3-4). Температура газа понизится относительно первоначальной (комнатной), т.е.  $T_4 < T_3$ .

5. Оставшийся в баллоне газ станет нагреваться при  $V = \text{const}$  до температуры окружающей среды (см. рис. 2, *изохорное нагревание*, кривая 4-5). При этом давление повышается до  $p_5$ . Установившееся давление  $p_5$  связано с  $p_0$  соотношением  $p_5 = p_0 + \rho gh_2$ , где  $\rho gh_2$  — избыточное по сравнению с атмосферным давление, определяемое по манометру.

**Вывод рабочей формулы для определения показателя адиабаты.** В состояниях 1, 3, 5 температура воздуха равна температуре окружающей среды  $T_0$ , на диаграмме состояний (см. рис. 2) эти точки лежат на одной *изотерме* (пунктирная кривая 1-3), т.е.  $T_1 = T_3 = T_5 = T_0$ .

3. Вследствие теплообмена с окружающей средой температура газа в баллоне понизится до первоначального значения (*изохорное охлаждение*, см. рис. 2, кривая 2-3). При этом устанавливается давление  $p_3$ , связанное с атмосферным соотношением  $p_3 = p_0 + \rho gh_1$ , где  $\rho gh_1$  — избыточное по сравнению с  $p_0$  давление, которое определяется по разности уровней жидкости в манометре;  $\rho$  — плотность воды;  $g$  — ускорение

Масса газа, находящегося в баллоне в начальном состоянии, определяется соотношением

$$m_0 = \frac{p_0 V_0 M}{T_0 R},$$

где  $M$  – молярная масса газа.

В течение рассматриваемых термодинамических процессов масса газа в баллоне изменяется. Обозначим ее  $m_0$  и назовем рабочей массой газа, т.к. накачиваемый и выпускаемый газ служит лишь для сжатия и расширения рабочей массы газа.

Для точек 3 и 4, лежащих на одной адиабате, используя уравнение Пуассона (1), можно записать

$$p_3 V_3^\gamma = p_4 V_4^\gamma. \quad (7)$$

Для точек 3 и 5 выполняется следующее условие (закон Бойля-Мариотта):

$$p_3 V_3 = p_5 V_5. \quad (8)$$

Учитывая, что  $V_4 = V_5$  (изохорический процесс), перепишем уравнение (8):

$$p_3 V_3 = p_5 V_4. \quad (9)$$

Возведем уравнение (9) в степень  $\gamma$  и разделим его на уравнение (7), получаем

$$\frac{p_3^\gamma V_3^\gamma}{p_3 V_3} = \frac{p_5^\gamma V_4^\gamma}{p_4 V_4}.$$

Откуда следует

$$\left( \frac{p_5}{p_3} \right)^\gamma = \frac{p_4}{p_3} = \frac{p_0}{p_3}.$$

Используя формулы  $p_3 = p_0 + \rho g h_1$  и  $p_5 = p_0 + \rho g h_2$ , получаем

$$\left( \frac{p_0 + \rho g h_2}{p_0 + \rho g h_1} \right)^\gamma = \frac{p_0}{p_0 + \rho g h_1}.$$

Логарифмируя это выражение, выразим  $\gamma$ :

$$\gamma = \frac{\ln p_0 - \ln(p_0 + \rho g h_1)}{\ln(p_0 + \rho g h_2) - \ln(p_0 + \rho g h_1)}. \quad (10)$$

Упростим уравнение (10), воспользуемся формулой  $\ln(1+x) \approx x$  при  $x \ll 1$ . Учтем также, что  $p_0 \gg \rho g h_1$  и  $p_0 \gg \rho g h_2$ , получаем

$$\ln(p_0 + \rho gh_1) = \ln \left[ p_0 \left( 1 + \frac{\rho gh_1}{p_0} \right) \right] \approx \ln p_0 + \frac{\rho gh_1}{p_0};$$

$$\ln(p_0 + \rho gh_2) = \ln \left[ p_0 \left( 1 + \frac{\rho gh_2}{p_0} \right) \right] \approx \ln p_0 + \frac{\rho gh_2}{p_0}.$$

Подставив полученные выражения в формулу (10), получаем рабочую формулу для вычисления показателя адиабаты воздуха:

$$\gamma = \frac{h_1}{h_1 - h_2}. \quad (11)$$

 **Формула работы в адиабатическом процессе.** Полная работа адиабатического процесса может быть вычислена по формуле

$$A = \frac{p_1 V_1}{\gamma - 1} \left( 1 - \frac{T_2}{T_1} \right).$$

По закону Пуассона (1) выразим отношение температур

$$\frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

и подставим в формулу работы. Получаем уравнение для вычисления работы адиабатического расширения:

$$A = \frac{(p_0 + \rho gh_1) V_1}{\gamma - 1} \left[ 1 - \left( \frac{p_0}{p_0 + \rho gh_1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \right]. \quad (12)$$



### Выполнение работы

1. Заготовить таблицу для записи результатов измерений.

Номер опыта	1	2	3	4	5
$h_1$ , см					
$h_2$ , см					
$h_1 - h_2$ , см					
$\gamma_i$					

2. Накачать в баллон столько воздуха, чтобы разность уровней воды в манометре достигла 25–30 см (см. рис. 2, процесс 1-2).

3. После того, как падение давления в баллоне прекратится (закончится изохорное охлаждение воздуха до комнатной температуры), отсчитать разность уровней жидкости в коленах манометра  $h_1$ .

4. Кратковременно нажать на клапан, соединяющий баллон с атмосферой. При этом часть воздуха с характерным шумом выходит из баллона. В этот момент давление в сосуде будет близко по значению к атмосферному, что можно визуалью наблюдать по манометру, т.к. уровни жидкости разойдутся на незначительное расстояние (4–6 см).

5. Спустя некоторое время (30–120 с) повышение давления прекратится (закончится изохорное нагревание до комнатной температуры), измерить разность уровней в обоих коленах манометра  $h_2$ .

6. Повторить пп. 2–5 не менее 4–5 раз.



### Обработка результатов измерений

1. По формуле (11) вычислить значение  $\gamma$  для каждого опыта.

2. Определить среднее значение показателя адиабаты  $\langle \gamma \rangle$ .

3. *Вычисление погрешности косвенного измерения показателя адиабаты.* Эта погрешность может быть определена двумя способами: 1) дифференцированием функции (11) с учетом погрешностей прямых измерений  $\Delta h_1$  и  $\Delta h_2$  [уравнение (13)]; 2) дифференцированием натурального логарифма функции (11) [уравнение (14)].

$$\Delta\gamma = \sqrt{\left(\frac{\partial\gamma}{\partial h_1}\Delta h_1\right)^2 + \left(\frac{\partial\gamma}{\partial h_2}\Delta h_2\right)^2}; \quad (13)$$

$$\varepsilon = \sqrt{\left(\frac{\partial \ln \gamma}{\partial h_1}\Delta h_1\right)^2 + \left(\frac{\partial \ln \gamma}{\partial h_2}\Delta h_2\right)^2}. \quad (14)$$

3.1. Вычисление  $\Delta\gamma$  по второму способу. Логарифмируем уравнение (11):

$$\ln \gamma = \ln h_1 - \ln(h_1 - h_2). \quad (15)$$

3.2. Найдем частные производные от функции (15) по соответствующим переменным:

$$\frac{\partial \ln \gamma}{\partial h_1} = \frac{1}{h_1} + \frac{1}{h_1 - h_2} = \frac{h_1 - h_2 - h_1}{h_1(h_1 - h_2)} = -\frac{h_2}{h_1(h_1 - h_2)};$$

$$\frac{\partial \ln \gamma}{\partial h_2} = \frac{1}{h_1 - h_2}.$$

3.3. Подставим полученные значения частных производных в уравнение (14), получим уравнение

$$\varepsilon_\gamma = \sqrt{\left(\frac{h_2}{h_1(h_1 - h_2)} \Delta h_1\right)^2 + \left(\frac{\Delta h_2}{h_1 - h_2}\right)^2}. \quad (16)$$

Преобразуем уравнение (16) к следующему виду:

$$\varepsilon_\gamma = \frac{h_1}{h_1 - h_2} \sqrt{\left(\frac{h_2}{h_1^2} \Delta h_1\right)^2 + \left(\frac{\Delta h_2}{h_1}\right)^2} = \gamma \sqrt{\left(\frac{h_2}{h_1^2} \Delta h_1\right)^2 + \left(\frac{\Delta h_2}{h_1}\right)^2}. \quad (17)$$

3.4. Вычислим абсолютную погрешность косвенного измерения:

$$\Delta \gamma = \langle \gamma \rangle \cdot \varepsilon_\gamma.$$

3.5. Запишем окончательный результат в следующем виде:

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

4. Вычислим работу адиабатического расширения по формуле (12).



### Контрольные вопросы

1. Дайте определение теплоемкости физического тела и укажите соответствующие единицы измерения. Приведите формулы и дайте определение молярной и удельной теплоемкостей. Укажите их единицы измерения. Как эти теплоемкости связаны между собой?

2. Какой процесс называется адиабатным? Запишите первое начало термодинамики для адиабатного процесса. При каких условиях возможно осуществление этого процесса?

3. Как меняется температура в адиабатном процессе при расширении или сжатии газа?

4. Дайте определение степени свободы. Какие бывают степени свободы? Сколько степеней свободы и каких у одно-, двух- и трехатомных молекул?

5. Напишите все возможные виды уравнения адиабаты идеального газа. От чего зависит показатель адиабаты идеального газа? Приведите соответствующие формулы.

6. Как определяется теоретический показатель адиабаты для одно-, двух- и трехатомных (или многоатомных) молекул?
7. На диаграмме  $P-V$  укажите все процессы, происходящие над газом в баллоне.
8. Объясните принцип работы водяного манометра.
9. Приведите уравнение, где указывается связь между теплоемкостями  $C_p$  и  $C_V$ . Какая из этих величин больше и почему?
10. Почему воздух можно считать двухатомным газом?
11. Выведите рабочую формулу для определения показателя адиабаты.
12. Как определяется погрешность косвенного измерения  $\Delta\gamma$ ?
13. Выведите формулу для работы идеального газа при адиабатном процессе.



#### *Библиографический список*

- [1, § 41–44; § 50–51, § 53–55];
- [2, § 9.3, § 9.5–9.6, § 10.11];
- [3, § 1.5, § 1.9–1.10];
- [4, § II.2.1–II.2.3, § II.2.5, § II.3.7];
- [5, § 4.7–4.8].



## Библиографический список

- [1, § 41–44; § 50–51, § 53–55];  
[2, § 9.3, § 9.5–9.6, § 10.11];  
[3, § 1.5, § 1.9–1.10];  
[4, § II.2.1–II.2.3, § II.2.5, § II.3.7];  
[5, § 4.7–4.8].

## Лабораторная работа № 8

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНТРОПИИ ПРИ ИЗОХОРНОМ ОХЛАЖДЕНИИ ВОЗДУХА

Цель работы: определить изменения энтропии при изохорном охлаждении воздуха.

Приборы и принадлежности: закрытый стеклянный баллон с клапаном, насос, жидкостный манометр, термометр.



### Основы теории

**Термодинамические параметры состояния.** Рассматривая различные процессы, происходящие с газом, его состояние характеризуется давлением, объемом, температурой и плотностью. При этом предполагается, что во всех точках данного объема эти величины одинаковы. Их называют термодинамическими параметрами состояния. Равенство этих параметров во всех точках системы возможно только при условии, что она находится в состоянии равновесия. Если же в системе происходят какие-либо процессы, то данное условие нарушается.

**Статистический метод.** Беспорядочность движения молекул ведет в общем к наличию определенных закономерностей. Кинетическая энергия движения отдельных молекул может принимать самые разнообразные значения при данном равновесном состоянии вещества, средняя же энергия, приходящаяся на одну степень свободы, имеет при этом вполне определенное значение. Это среднее значение энергии определяет температуру тела. Сумма потенциальных и кинетических энергий беспорядочно движущихся молекул составляет запас внутренней энергии вещества.



В молекулярной физике изучают процессы, которые являются результатом совместного действия большого числа частиц. Поэтому макроскопические величины обладают определенными значениями, т.к. они являются средними значениями очень большого числа отдельных элементарных процессов. Законы поведения огромного числа молекул изучают с помощью *статистического метода*.

**Термодинамический метод.** Существует и другой способ описания явлений. Возможно описывать поведение тел и без того, чтобы учитывать детальное рассмотрение тех процессов, которые при этом происходят. Такое описание возможно благодаря введению понятия энергии, ее превращений, способов передачи и установлению тех основных законов, которым подчиняются эти превращения энергии из одних видов в другие.

Раздел физики, рассматривающий процессы с указанной энергетической точки зрения, называется *термодинамикой*. Термодинамика, не входя в микроскопическое рассмотрение процессов, позволяет делать целый ряд выводов относительно их общего протекания, столь же достоверных, как и те фундаментальные законы, которые лежат в ее основе. Рассматривая какой-либо процесс с термодинамической точки зрения, важно знать, каким числом физических величин и какими именно физическими величинами состояние системы может быть однозначно определено.

Основу термодинамики образуют ее два начала. Первое начало устанавливает количественные соотношения, имеющие место при превращениях энергии из одних видов в другие. Второе начало определяет условия, при которых возможны эти превращения, т.е. определяет возможные направления процессов.

**Макросостояния. Микросостояния. Статистический вес. Энтропия.** *Макросостояние* – это состояние макроскопического тела (т.е. тела, образованного огромным числом молекул), которое может быть задано с помощью объема, давления, температуры, внутренней энергии и других макроскопических (т.е. характеризующих все тело в целом) величин.

Состояние макроскопического тела, охарактеризованное настолько подробно, что оказываются заданными состояния всех образующих тело молекул, называется *микросостоянием*.

Всякое макросостояние может быть осуществлено различными способами, каждому из которых соответствует некоторое микросостояние тела.

Число различных микросостояний, соответствующих данному макросостоянию, называется статистическим весом или термодинамической вероятностью макросостояния  $W$ .

Термодинамическая вероятность служит характеристикой направленности тепловых процессов. Однако вычисление термодинамической вероятности является очень сложной задачей, т.к. практически чрезвычайно трудно подсчитать число различных комбинаций молекул, соответствующих тому или иному состоянию системы. Поэтому для термодинамических расчетов используется иная физическая величина, введенная Клаузиусом и названная энтропией  $S$ .

**Энтропия и теплообмен.** Если тело получает или отдает некоторое количество теплоты  $Q$ , при этом его энтропия будет изменяться. Клаузиус показал, что это изменение определяется следующим образом:

$$S_{1-2} = S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{dQ}{T} = \frac{\Delta Q}{T}, \quad (1)$$

где  $S_1$  – энтропия начального состояния;  $S_2$  – энтропия конечного состояния;  $T$  – температура, при которой происходит теплообмен;  $Q$  – отданное или полученное количество теплоты. При этом справедливо следующее правило знаков: 1) если тело при теплообмене получает энергию, то  $Q > 0$ ; 2) если тело при теплообмене теряет энергию, отдавая ее другому телу, то  $Q < 0$ .

Свойства энтропии:

1. Энтропия системы полностью определяется состоянием, в котором находится система, она не зависит от того процесса, с помощью которого система пришла в это состояние.

2. Энтропия системы, состоящей из двух (или нескольких) независимых частей, равна сумме энтропий этих частей.

3. Энтропия изолированной системы при протекании необратимого процесса возрастает.


4. Энтропия системы, находящейся в равновесном состоянии, максимальна.

**Второе начало термодинамики.** Утверждение о том, что энтропия изолированной системы может только возрастать (либо по достижении максимального значения оставаться неизменной), носит название *закона возрастания энтропии* или *второго начала термодинамики*. Иначе говоря, энтропия изолированной системы не может убывать.

Энтропия – важная функция термодинамического состояния системы. По характеру изменения энтропии можно судить о протекании того или иного процесса. Энтропия характеризует степень близости системы к равновесному состоянию. Прибора, непосредственно измеряющего энтропию, не существует. Ее вычисляют по результатам измерений других параметров, с которыми энтропия непосредственно связана.

## ✂ Методика выполнения эксперимента и описание установки

Экспериментальная установка показана на рис. 1, описание процессов, происходящих в газе, показано на рис. 2 (см. описание экспериментальной установки к лабораторной работе № 7).

 **Вывод рабочей формулы для определения изменения энтропии.** Если клапан баллона открыть, то в баллоне устанавливается атмосферное давление  $p_0$  (давление в лаборатории), разность уровней воды в коленях манометра равна нулю, температура воздуха в баллоне при этом равна комнатной. Если при закрытом клапане накачать воздух в баллон с помощью насоса (адиабатическое сжатие, см. рис. 2, изолиния 1–2), то температура воздуха в баллоне повысится, а давление станет равным

$$p_1 = p_0 + \rho g h_1, \quad (2)$$

где  $h_1$  – разность уровней воды в коленях манометра непосредственно после накачки воздуха (т.е. в точке 2, см. рис. 2).

Т.к. температура в баллоне выше комнатной, то это обуславливает передачу тепла из баллона через его стенки в окружающую среду. Воздух в баллоне при этом изохорически охлаждается (см. рис. 2, изолиния 2–3), его давление и температура падают. Когда температура воздуха в баллоне станет равной комнатной, давление перестанет изменяться и станет равным

$$p_2 = p_0 + \rho g h_2, \quad (3)$$

где  $h_2$  – установившаяся после охлаждения разность уровней воды в коленях манометра (т.е. в точке 3, см. рис. 2).

Найдем выражение для изменения энтропии при изохорном охлаждении воздуха. Согласно первому началу термодинамики при изохорном процессе для идеального газа все переданное ему тепло  $dQ$  идет на изменение его внутренней энергии  $dU$ :

$$dQ = dU = \frac{i}{2} \cdot \frac{m}{M} R dT, \quad (4)$$

где  $m$  – масса газа;  $M$  – молярная масса газа;  $R$  – универсальная газовая постоянная.

Подставим (4) в (1). Интегрируя это выражение, получаем

$$S = \frac{i}{2} \cdot \frac{m}{M} R \ln \frac{T_2}{T_1}, \quad (5)$$

где  $T_1$  – температура газа в точке 2;  $T_2$  – в точке 3 (см. рис. 2).

Запишем уравнение Менделеева-Клапейрона для состояний 1 и 2, учитывая, что объем колбы  $V$  и масса газа  $m$  в результате протекания изохорного процесса не изменяются:

$$p_1 V = \frac{m}{M} R T_1; \quad (6)$$

$$p_2 V = \frac{m}{M} R T_2. \quad (7)$$

Разделим уравнение (7) на уравнение (6), получим

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{p_2}{p_1}. \quad (8)$$

Из уравнения (7) выразим следующее соотношение:

$$\frac{m}{M} R = V \frac{p_2}{T_2}. \quad (9)$$

Подставим (8) и (9) в (5), получаем

$$S = \frac{i}{2} V \frac{p_2}{T_2} \ln \frac{p_2}{p_1}. \quad (10)$$

Преобразуем  $\ln \frac{p_2}{p_1}$  с учетом уравнений (2) и (3).

$$\ln \frac{p_2}{p_1} = \ln \left[ p_0 \left( 1 + \frac{\rho g h_2}{p_0} \right) \right] - \ln \left[ p_0 \left( 1 + \frac{\rho g h_1}{p_0} \right) \right] = \ln \frac{\rho g (h_2 - h_1)}{p_0}. \quad (11)$$

Подставим выражение (11) в (10), получаем формулу для вычисления энтропии при изохорном охлаждении воздуха:

$$S = \frac{i}{2} \cdot \frac{V}{T_2} \ln \frac{\rho g (h_2 - h_1)}{p_0}. \quad (12)$$

Воздух является смесью в основном двухатомных молекул, для которых число степеней свободы равно  $i = 5$ .



### Выполнение работы

1. Заготовить таблицу для записи результатов измерений.

Номер опыта	$V, \text{ м}^3$	$i$	$T_2, \text{ К}$	$h_1, \text{ м}$	$h_2, \text{ м}$	$h_2-h_1, \text{ м}$	$S, \text{ Дж/К}$	$\langle S \rangle, \text{ Дж/К}$

2. Клапан закрыт. Накачать с помощью насоса воздух в баллон так, чтобы разность уровней воды в коленах манометра была в пределах 25...30 см. С помощью зажима перекрыть сообщение между баллоном и насосом и в этот момент записать показание  $h_1$ .

3. Подождать, пока давление перестанет изменяться (температура воздуха в баллоне станет равна комнатной), записать показание  $h_2$ .

4. Открыть клапан и выпустить воздух из баллона.

5. Повторить пп. 2–4 еще 5–6 раз.

6. Определить по термометру температуру воздуха  $T_2$ .

7. Определить атмосферное давление  $p_0$  по барометру.



### Обработка результатов измерений

1. По формуле (12) вычислить значение  $S$  для каждого опыта.

2. Определить среднее значение  $\langle S \rangle$ .

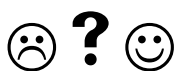
3. Самостоятельно вычислить относительную погрешность  $\varepsilon$  по методике, рассмотренной в лабораторных работах № 6 и 7.

4. Вычислить погрешность косвенного измерения

$$\Delta S = \varepsilon \langle S \rangle.$$

5. Записать окончательный результат в следующем виде:

$$S = \langle S \rangle \pm \Delta S, \text{ ед.изм.}$$



### Контрольные вопросы

1. Какие параметры состояния системы называют термодинамическими? Сформулируйте физический смысл каждого параметра.

2. Какие методы используют в физике для описания процессов в больших многокомпонентных системах? Дайте краткую характеристику каждому методу.

3. Дайте определение микросостояния и макросостояния системы. Какая существует связь между ними?

4. Сформулируйте физический смысл энтропии. Как вычисляют энтропию в различных изопроцессах? Перечислите свойства энтропии.

5. Выведите рабочую формулу для определения энтропии при изохорном охлаждении воздуха.



## *Библиографический список*

- [1, § 54, § 57–58];
- [2, § 9.1, § 11.3, § 11.5];
- [3, § 1.5, § 2.11, § 3.4];
- [4, § II.4.3–II.4.5];
- [5, § 4.7–4.8].



## Библиографический список

- [1, § 54, § 57–58];  
[2, § 9.1, § 11.3, § 11.5];  
[3, § 1.5, § 2.11, § 3.4];  
[4, § II.4.3–II.4.5];  
[5, § 4.7–4.8].

## Лабораторная работа № 9

### ИЗУЧЕНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО ЦИКЛА. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КПД ТЕПЛООВОГО ДВИГАТЕЛЯ

Цели работы: вычисление работы, количества теплоты, изменения внутренней энергии и КПД термодинамического цикла. Сравнение КПД термодинамического цикла с циклом Карно. Проверка равенств: 1)  $\Delta U_{\text{цикла}}=0$ ; 2)  $A_{\text{цикла}}=Q_{\text{цикла}}$ .

Приборы и принадлежности: диаграмма с изображением прямого термодинамического цикла с указанием всех параметров газа.



## Основы теории

**Первое начало термодинамики.** Связь между количеством теплоты, работой и внутренней энергией установлена в первом начале термодинамики, которое представляет собой выражение закона сохранения энергии в применении к термодинамическим процессам.

*Количество теплоты, переданное системе, идет на изменение внутренней энергии системы и совершение системой работы:*

$$Q = \Delta U + A. \quad (1)$$

Под *внутренней энергией* системы понимают сумму кинетической и потенциальной энергий частиц, из которых состоит система. Внутренняя энергия является функцией состояния системы и для данного состояния имеет вполне определенное значение. Изменение внутренней энергии  $\Delta U$  есть разность двух значений внутренней энергии, соответствующих конечному и начальному состояниям системы:

$$\Delta U = U_2 - U_1. \quad (2)$$

Изменение внутренней энергии в круговом процессе равно нулю, т.к. начальное и конечное состояния системы совпадают. Внутренняя энергия системы может измениться как за счет совершения системой работы, так и за счет передачи системе некоторого количества теплоты.

При совершении работы происходит изменение объема системы. Работа, совершенная газом, определяется как интегральная величина:

$$A = \int_{V_1}^{V_2} p dV. \quad (3)$$

Работа  $A$ , изменение внутренней энергии  $\Delta U$  и количество теплоты  $Q$  – скалярные величины, их знаки определяются следующим образом: работа положительна ( $A > 0$ ), если объем возрастает ( $\Delta V > 0$ ); внутренняя энергия положительна ( $\Delta U > 0$ ), если температура возрастает ( $\Delta T > 0$ ); знак перед количеством теплоты определяют по первому началу термодинамики. Если получившееся значение  $Q$  для данного процесса положительно ( $Q > 0$ ), то это означает, что теплота подводится в этом процессе. Если значение  $Q$  отрицательно ( $Q < 0$ ), то теплота отводится.

**Применение первого начала термодинамики к различным изопроцессам.** В табл. 1 приведены формулы для вычисления работы, количества теплоты и изменения внутренней энергии в изопроцессах.

Таблица 1

**Первое начало термодинамики в изопроцессах**

Физическая величина	Термодинамический процесс			
	изохорический	изотермический	изобарический	адиабатический
$\Delta U$	$\Delta U = \frac{i}{2} R \nu \Delta T$	0	$\Delta U = \frac{i}{2} R \nu \Delta T$	$\Delta U = \frac{i}{2} R \nu \Delta T$
$A$	0	$A = \nu R T \ln \frac{V_2}{V_1}$	$A = p \Delta V,$ $A = \nu R \Delta T$	$A = \frac{i}{2} \nu R (T_1 - T_2)$
$Q$	$Q = \Delta U$	$Q = A$	$Q = \frac{i+2}{2} R \nu \Delta T$	0

Обозначения:  $m$  – масса газа;  $M$  – молярная масса;  $\nu = \frac{m}{M}$  – количество вещества.



Число степеней свободы  $i$ : для одноатомных молекул  $i = 3$ ; для двухатомных молекул  $i = 5$ ; если молекула содержит три и более атомов,  $i = 6$ .

**Термодинамические процессы и циклы.** Любое изменение в термодинамической системе, связанное с изменением хотя бы одного из параметров, называют *термодинамическим процессом*.

Термодинамический процесс называют *обратимым*, если он может происходить как в прямом, так и в обратном направлении, при этом система возвращается в исходное состояние и в окружающей среде и в этой системе не произошло никаких изменений. Процесс, не удовлетворяющий этим условиям, будет *необратимым*.

*Круговым* процессом (или *циклом*) называют совокупность термодинамических процессов, в результате которых система возвращается в исходное состояние.

Процессы в прямом цикле (рис. 1) протекают по ходу часовой стрелки. Работа газа по диаграмме в данных координатах определяется площадью под графиком процесса [геометрический смысл уравнения (3)]. Из рис. 1 следует, что работа расширения больше работы сжатия, в результате суммарная работа сил давления газа в прямом цикле положительна. В обратном цикле процессы протекают в противоположном направлении: работа сжатия больше работы расширения и суммарная работа силы давления газа отрицательна.

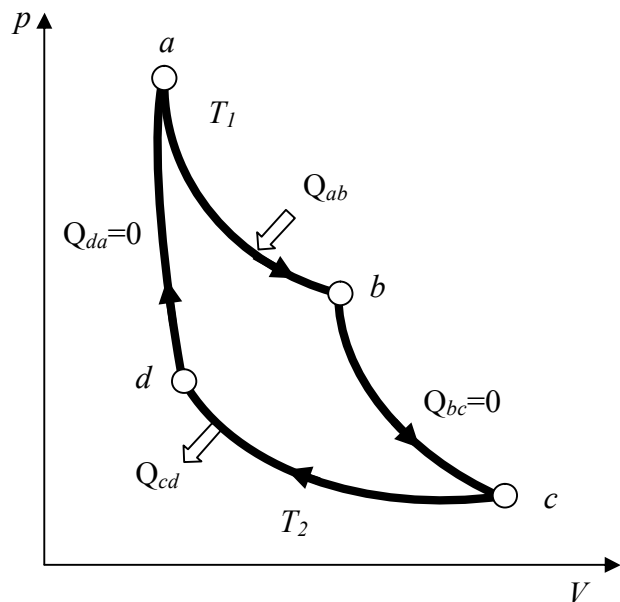


Рис. 1. Прямой цикл

Прямой цикл реализуется в тепловых двигателях для превращения тепловой энергии в механическую. Обратные круговые процессы находят практическое применение в холодильниках, кондиционерах, тепловых насосах.

**Коэффициент полезного действия теплового двигателя.** Любой тепловой двигатель включает в себя три элемента: рабочее вещество (газ или пар), совершающее круговой процесс; нагреватель

– устройство, от которого рабочее вещество получает количество теплоты  $Q_1$ ; охладитель – устройство, которому рабочее вещество при совершении цикла отдает часть тепла  $Q_2$  (рис. 2). Необходимость наличия другого, кроме нагревателя, тела, которому рабочее тело в тепловом двигателе должно отдавать часть тепла для совершения кругового процесса, отражена в одной из формулировок второго закона термодинамики: *невозможен круговой процесс, единственным результатом которого было бы совершение работы за счёт внутренней энергии, отнимаемой от одного какого-либо тела путём теплообмена.*

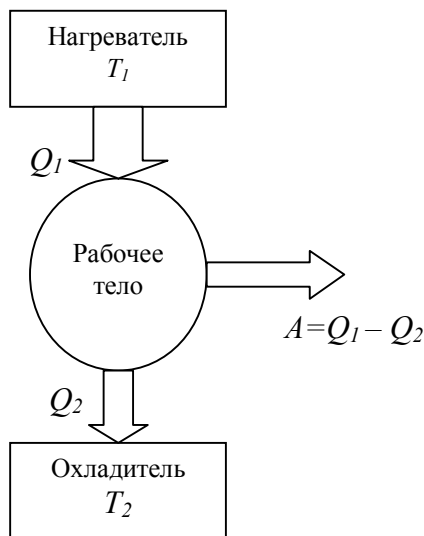


Рис. 2. Схема теплового двигателя

Полная механическая работа, совершённая рабочим телом в ходе цикла, равна

$$A_{\text{цикла}} = |Q_1| - |Q_2|,$$

Коэффициентом полезного действия (КПД) теплового двигателя называют отношение механической работы, совершённой рабочим телом в ходе одного цикла, к количеству подведённой при этом теплоты:

$$\eta = A_{\text{цикла}}/Q_{\text{подв}},$$

где  $A_{\text{цикла}}$  – суммарная работа сил давления газа во всех процессах цикла;  $Q_{\text{подв}}$  – сумма количеств теплоты в тех процессах, где теплота подводится. Например, для

цикла, изображённого на рис. 2,

$$A_{\text{цикла}} = A_{ab} + A_{bc} + A_{cd} + A_{da}.$$

**Цикл Карно.** Обратимый круговой процесс (см. рис. 1), состоящий из двух изотермических и двух адиабатных процессов. Теплота  $Q_1$  подводится в процессе  $ab$  изотермического расширения при температуре  $T_1$ ; теплота  $Q_2$  отводится при изотермическом сжатии  $cd$  при более низкой температуре  $T_2$ . Процессы  $bc$  и  $da$  происходят без теплообмена. КПД этого цикла равен

$$\eta_C = \frac{T_1 - T_2}{T_1}.$$

Цикл Карно – единственный цикл, который можно осуществить между нагревателем и охладителем с фиксированными температурами. Обратимый теплообмен между рабочим веществом и нагревателем или охладителем может происходить только в изотермическом

процессе с одинаковыми температурами тел. Наличие конечной разности температур между телами приводит к необратимости процесса из-за невозможности теплообмена в обратном направлении от холодного тела к горячему. Переходы между изотермами в цикле Карно могут быть осуществлены только адиабатически (без теплообмена), так как отсутствует контакт рабочего вещества с телами, имеющими промежуточные температуры от  $T_1$  и  $T_2$ . В других циклах, имеющих практическое значение, температуры, при которых рабочее вещество получает или отдаёт тепло, не постоянны. В реальных тепловых двигателях процессы теплопередачи (к рабочему веществу и от него) протекают настолько быстро, что изменения внутренней энергии при расширении и сжатии не могут быть полностью скомпенсированы притоком энергии от нагревателя и отдачей энергии охладителю. Таким образом, процессы в тепловых машинах не могут быть строго изотермическими. Кроме того, в реальных тепловых двигателях процессы в циклах не являются равновесными, а следовательно, циклы – обратимыми. Эти выводы представлены в физике тепловых явлений в виде трех теорем Карно: 1) КПД тепловой машины, работающей по циклу Карно, не зависит от выбора рабочего вещества и конструктивных деталей осуществления цикла и определяется только температурами нагревателя и охладителя; 2) КПД необратимой машины, работающей по циклу Карно всегда меньше КПД обратимой машины, работающей по тому же циклу; 3) КПД обратимого цикла Карно больше любого другого обратимого цикла, в котором максимальная и минимальная температуры равны соответственно температурам нагревателя и охладителя в цикле Карно,  $\eta_c > \eta$ .



### Выполнение работы

1. Заготовить табл. 2–4 для записи результатов измерений.

Таблица 2

#### Параметры начальных и конечных состояний рабочего вещества

Параметры	$a$	$b$	$c$	$d$
$V, \text{ м}^3$				
$T, \text{ К}$				
$p, \text{ Па}$				

Таблица 3

#### Энергетические параметры процессов

Процессы	$A, \text{ Дж}$	$\Delta U, \text{ Дж}$	$Q, \text{ Дж}$

<i>ab</i>			
<i>bc</i>			
<i>cd</i>			
<i>da</i>			

Таблица 4

**Энергетические параметры и КПД рабочего цикла**

$Q_{\text{подв}},$ Дж	$Q_{\text{отв}},$ Дж	$A_{\text{цикла}},$ Дж	$\Delta U_{\text{цикла}},$ Дж	$Q_{\text{цикла}},$ Дж	$\eta, \%$	$T_{\text{max}}=T_1,$ К	$T_{\text{min}}=T_2,$ К	$\eta_c, \%$

2. Произвести отсчёты начальных и конечных параметров газа для каждого из термодинамических процессов заданного цикла по шкалам диаграммы. Недостающий параметр найти из уравнения состояния

$$pV = \nu RT.$$

Результаты занести в табл. 2.

3. Построить рабочий цикл в координатах  $p$ – $V$ ,  $p$ – $T$ ,  $V$ – $T$  в соответствии с численными значениями параметров газа, указанных на исходной диаграмме для данного цикла.

4. На одной из диаграмм показать стрелками процессы, в которых теплота подводится (см. рис. 1) (стрелка направлена внутрь цикла), и процессы, в которых теплота отводится (стрелка направлена наружу).

5. Рассчитать работу  $A$  сил давления газа, изменение внутренней энергии  $\Delta U$  и количество теплоты  $Q$  для каждого из процессов (с учётом знака). Результаты занести в табл. 3.

6. Вычислить работу цикла как алгебраическую сумму работ газа в каждом из процессов:

$$A_{\text{цикла}} = A_{ab} + A_{bc} + A_{cd} + A_{da}.$$

7. Вычислить количество подведённой теплоты в ходе всего цикла  $Q_{\text{подв}}$  как сумму количеств теплоты в тех процессах, где теплота подводится.

8. Рассчитать КПД теплового двигателя, работающего по заданному циклу:

$$\eta = \frac{A_{\text{цикла}}}{Q_{\text{подв}}}.$$

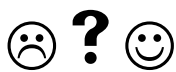
9. Вычислить алгебраическую сумму изменений внутренней энергии в ходе цикла  $\Delta U_{\text{цикла}}$  и проверить равенство  $A_{\text{цикла}} = Q_{\text{цикла}}$ .

10. Вычислить КПД идеальной тепловой машины (машины, работающей по циклу Карно), принимая температуру нагревателя  $T_1$  равной максимальной температуре газа в заданном цикле, а температуру охладителя  $T_2$  равной минимальной температуре газа в исходном цикле:

$$\eta_C = \frac{T_1 - T_2}{T_1}.$$

Сравнить полученные значения  $\eta_C$  и  $\eta$ .

11. Все вычисленные данные в пп. 6–10 занести в табл. 4, проанализировать результаты и сделать соответствующие выводы.



### Контрольные вопросы

1. Что такое термодинамический процесс? круговой процесс?
2. Какие процессы называют обратимыми? необратимыми?
3. Сформулируйте первое начало термодинамики. Запишите уравнение первого начала термодинамики для каждого изопроцесса.
4. По каким формулам вычисляют в общем случае величины, входящие в уравнение первого начала термодинамики?
5. Какие величины в термодинамике зависят только от начального и конечного состояний, а какие от вида процесса, посредством которого происходит переход из начального в конечное состояние?
6. Чем определяется знак (“+” или “–”) следующих величин: а) работы, совершаемой силой давления газа; б) изменения внутренней энергии; в) количества теплоты?
7. Запишите формулу КПД реального теплового двигателя. От чего зависит КПД теплового двигателя?
8. От каких величин зависит максимальный КПД идеальной тепловой машины?
9. Изобразите цикл Карно в координатах: а) “давление – объём”; б) “энтропия – температура”.
10. Сделайте вывод формулы КПД теплового двигателя, работающего по циклу Карно, с использованием диаграммы в координатах  $T - S$  (температура – энтропия).



### Библиографический список

[1, § 50–51, § 53–54, § 56, § 58–59];

[2, § 9.1–9.5, § 11.1–11.2, § 11.4–11.5];

[3, § 1.5, § 2.11, § 3.2];

[4, § II.2.1–II.2.4, § II.4.1–II.4.3];

[5, § 4.4–4.8].



## Библиографический список

- [1, § 50–51, § 53–54, § 56, § 58–59];  
[2, § 9.1–9.5, § 11.1–11.2, § 11.4–11.5];  
[3, § 1.5, § 2.11, § 3.2];  
[4, § II.2.1–II.2.4, § II.4.1–II.4.3];  
[5, § 4.4–4.8].

## Лабораторная работа № 10

### ИЗМЕРЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ ВЯЗКОСТИ ЖИДКОСТИ МЕТОДОМ СТОКСА

Цель работы: определить динамическую вязкость моторного масла при комнатной температуре.

Приборы и принадлежности: стеклянный цилиндр с исследуемой жидкостью, микроскоп, секундомер, металлическая дробь, масштабная линейка.



## Основы теории

**Внутреннее трение.** Если различные слои жидкости имеют разные скорости, то между ними существует сила взаимодействия, обусловленная тепловым движением молекул. За счет переноса импульса упорядоченного движения молекул из одного слоя в другой более быстрый слой тормозится, а более медленный ускоряется.

Свойство жидкостей или газов, проявляющееся во взаимодействии движущихся слоев, называют *внутренним трением* или *вязкостью*, а силу взаимодействия – *силой внутреннего трения*.

По закону Ньютона сила внутреннего трения равна

$$F = \eta \cdot \left| \frac{\Delta v}{\Delta x} \right| \cdot S, \quad (1)$$

где  $\eta$  – коэффициент внутреннего трения, или динамическая вязкость;  
 $\frac{\Delta v}{\Delta x}$  – среднее значение градиента скорости упорядоченного движения молекул (изменение скорости на единицу длины в направлении, перпендикулярном движению слоев жидкости);  $S$  – площадь соприкасающихся слоев.

**Коэффициент динамической вязкости.** Из формулы (1) можно выяснить физический смысл коэффициента динамической вязкости  $\eta$ .

$$\eta = \frac{F}{\left| \frac{\Delta v}{\Delta x} \right| \cdot S} \quad (2)$$

Коэффициент динамической вязкости численно равен силе внутреннего трения, действующей на единичную площадь соприкасающихся слоев при градиенте скорости этих слоев, равном единице.

Размерность коэффициента динамической вязкости в системе СИ:

$$\eta = \frac{\text{Н}}{\frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot \text{м}^2} = \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} \cdot \text{с} = \text{Па} \cdot \text{с}.$$

На практике широко используется понятие *кинематической вязкости*  $\nu = \eta/\rho$ , где  $\rho$  – плотность жидкости (или газа). Единица измерения кинематической вязкости в СИ  $[\nu] = \text{м}^2/\text{с}$ .

При повышении температуры вязкость жидкостей, в отличие от газов, существенно уменьшается. Приборы, служащие для измерения вязкости, называются вискозиметрами.

## ✂ Методика выполнения эксперимента и описание установки

📄 **Вывод рабочей формулы для определения коэффициента динамической вязкости.** Динамическая вязкость определяется по результатам измерений скорости равномерного движения шарика в маловязкой жидкости.

Согласно закону Стокса на сферическое тело, движущееся в безграничной жидкости со скоростью  $v$ , действует сила вязкого трения

$$F_c = 6\pi\eta r v = 3\pi\eta D v, \quad (3)$$

где  $D = 2r$  – диаметр шарика.

На шарик, свободно падающий в жидкости (рис.1), действуют сила тяжести  $m\vec{g}$ , выталкивающая сила (Архимеда)  $\vec{F}_A$  и сила вязкого сопротивления  $\vec{F}_c$ .

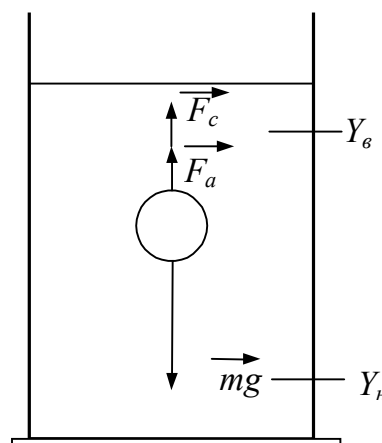


Рис. 1. Схема установки



При равномерном падении шарика ( $v = \text{const}$ , ускорение  $a = 0$ ) на основании второго закона Ньютона ( $\vec{F} = m\vec{a}$ ) получаем уравнение

$$\vec{F}_c + \vec{F}_A + m\vec{g} = 0, \quad (4)$$

где  $F_A = \rho_2 g V$  – сила Архимеда;  $mg = \rho_1 V g$  – сила тяжести;  $\rho_1$  и  $\rho_2$  – плотности шарика и исследуемой жидкости;  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$  – ускорение свободного падения; объем шарика определяем по формуле

$$V = \frac{4}{3}\pi r^3 = \frac{1}{6}\pi D^3.$$

Проецируя векторы на вертикальную ось, получим уравнение

$$3\pi\eta Dv + \frac{1}{6}\pi\rho_2 D^3 g - \frac{1}{6}\pi\rho_1 D^3 g = 0,$$

выразим из него коэффициент динамической вязкости:

$$\eta = \frac{1}{18} \frac{\rho_1 - \rho_2}{v} D^2 g. \quad (5)$$

Для определения динамической вязкости необходимо соблюдение условий: 1) жидкость безгранична; 2) скорость шарика постоянна.

Первое условие выполняется достаточно хорошо, если диаметр сосуда много больше диаметра шарика, а траектория шарика проходит как можно дальше от стенок сосуда, что достигается с помощью направляющей воронки, устанавливаемой на верхнем конце сосуда. Для выполнения второго условия отсчет начальной координаты начинают не от поверхности жидкости, а ниже уровня жидкости на 50–80 мм вниз, где торможение шарика после его погружения уже прекращается и движение становится равномерным. С этой целью на внешней поверхности цилиндра наносятся метки  $y_в$  и  $y_н$  (см. рис. 1). При прохождении этих меток производят начальный и конечный отсчет времени равномерного движения шарика  $\tau$ .

Скорость шарика определяется как при равномерном движении:

$$v = \frac{y_в - y_н}{\tau} = \frac{l}{\tau}, \quad (6)$$

где

$$l = y_в - y_н.$$

С учетом (6) формула (5) приобретает следующий вид:

$$\eta = \frac{1}{18} \frac{\rho_1 - \rho_2}{l} D^2 g \tau. \quad (7)$$



## Выполнение работы

1. Заготовить таблицу для записи результатов измерений.

Номер опыта	$D$ , мм	$l$ , м	$\tau$ , с	$\rho_1$ , кг/м <sup>3</sup>	$\rho_2$ , кг/м <sup>3</sup>	$t$ , °С	$\eta_i$ , Па·с	$\langle \eta \rangle$ , Па·с	$\Delta \eta$ , Па·с

2. Измерить диаметр шарика с помощью микроскопа. Для этого шарик размещают на предметном столике так, чтобы шкала перекрывала шарик по его диаметру. Произвести отсчет делений  $N$  шкалы. Рассчитать диаметр шарика по формуле

$$D = k \cdot N,$$

где  $k$  – цена деления окуляра.

3. Опустить через направляющую воронку шарик в жидкость. В момент прохождения верхней метки  $y_в$  включить секундомер и выключить при прохождении нижней метки  $y_н$ . Записать показания секундомера.

4. Измерить расстояние между метками  $l = y_в - y_н$ .

5. Повторить пп. 2–4 для 4–6 шариков разного диаметра.



### Обработка результатов измерений

1. По формуле (7) вычислить коэффициент динамической вязкости в каждом опыте  $\eta_i$ .

2. Вычислите среднее значение  $\langle \eta \rangle$ .

3. Вычислить относительную погрешность  $\varepsilon$  с помощью метода дифференцирования натурального логарифма функции (7).

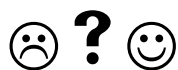
$$\varepsilon = \sqrt{\left(\frac{\partial \ln \eta}{\partial \rho_1} \Delta \rho_1\right)^2 + \left(\frac{\partial \ln \eta}{\partial \rho_2} \Delta \rho_2\right)^2 + \left(\frac{\partial \ln \eta}{\partial l} \Delta l\right)^2 + \left(\frac{\partial \ln \eta}{\partial D} \Delta D\right)^2 + \left(\frac{\partial \ln \eta}{\partial g} \Delta g\right)^2 + \left(\frac{\partial \ln \tau}{\partial \tau} \Delta \tau\right)^2}.$$

4. Вычислить абсолютную погрешность косвенного измерения

$$\Delta \eta = \varepsilon \cdot \langle \eta \rangle.$$

5. Записать окончательный результат в следующем виде:

$$\eta = \langle \eta \rangle \pm \Delta\eta, \text{ ед. изм.}$$



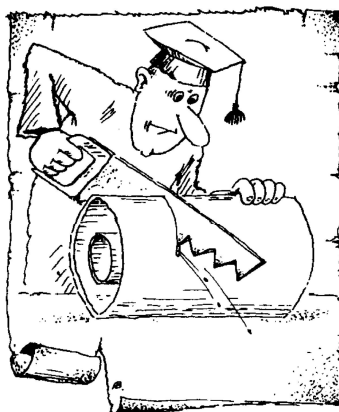
## Контрольные вопросы

1. Какие силы действуют на шарик, падающий в жидкости? Напишите уравнение движения шарика в жидкости. Как определяются направления и модули этих сил?
2. Какая сила быстрее растет с увеличением диаметра шарика, падающего в жидкости: сила тяжести или сила Стокса?
3. Объясните механизм возникновения внутреннего трения в газах и в жидкостях.
4. Сформулируйте физический смысл коэффициента динамической вязкости.
5. Как зависит коэффициент динамической вязкости от температуры для газов и жидкостей?
6. Что такое кинематическая вязкость? как она связана с динамической вязкостью?
7. Почему метод Стокса применим только для маловязких жидкостей?



## Библиографический список

- [1, § 31–32; § 47–48];
- [2, § 10.7–10.8];
- [3, § 7.1, § 7.5];
- [4, § II.3.8];
- [5, § 5.9];
- [6, § 12.8];
- [7, § 9.4].



## Обработка результатов физических измерений

Целью лабораторного эксперимента, как правило, является определение значений физических величин и установление между ними количественных соотношений. Измерением называется процесс сравнения измеряемой величины с однородной величиной, принятой за единицу измерения. В прямых измерениях искомое значение физической величины находят непосредственным отсчетом. При косвенном измерении результат вычисляют по формулам, исходя из данных прямых измерений. Любое измерение осуществляется с определенной степенью точности, поэтому результат измерения содержит некоторую погрешность.

**Виды погрешностей.** По характеру проявления погрешности разделяют на две основные группы. 1. *Систематические* погрешности сохраняют величину и знак от опыта к опыту. К ним относятся, например, погрешности, связанные с неправильным весом гирь, неточной разбивкой шкалы измерительных приборов и т. д. Эти погрешности в принципе могут быть исключены введением поправок, однако часто они остаются невыявленными. 2. *Случайные* погрешности обусловлены воздействием большого числа неконтролируемых причин, поэтому их величина и знак от опыта к опыту изменяются. Эти погрешности не могут быть учтены заранее, однако они подчиняются статистическим законам и их влияние может быть учтено и уменьшено при многократном повторении опыта.

Кроме названных погрешностей встречаются грубые ошибки, называемые *промахами*. Промахи могут появиться при неправильном отсчете, нарушении юстировки прибора, случайном воздействии значительного постороннего фактора и т. д. Результат, содержащий

грубую ошибку, резко отличается от остальных, и его после проверки следует исключить.

**Погрешности прямых измерений.** Если при повторных наблюдениях получаются одинаковые значения измеряемой величины, то повторять эксперимент не имеет смысла. В этом случае погрешность определяется точностью измерительного прибора. Если погрешность измерения на приборе не указана, она принимается равной цене наименьшего деления. Погрешность многих приборов определяется классом точности  $\gamma$ . Значение класса точности  $\gamma$  выражает отношение предельной абсолютной погрешности  $\Delta x$ , выраженной в процентах от верхнего предела измерений (на данном диапазоне)  $x_{\max}$ :

$$\gamma = \frac{\Delta x}{x_{\max}} \cdot 100\%.$$

Предельная погрешность в этом случае может быть определена по формуле

$$\Delta x = \frac{\gamma \cdot x_{\max}}{100\%}, \text{ ед. изм.}$$

В погрешность прибора могут входить как систематические (неточная разбивка шкалы и т.д.), так и случайные (силы трения в оси и т.д.) погрешности. Однако поскольку при увеличении числа измерений точность прибора не возрастает, их следует рассматривать как систематические, хотя и неизвестной величины.

**Погрешности многократных прямых измерений.** Статистическую обработку результатов проводят в том случае, если в процессе измерений при неизменных условиях результат не повторяется. Рекомендуется следующий порядок обработки результатов.

1. За результат измерений принимают среднее арифметическое результатов серии  $n$  измерений.

$$\langle x \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}. \quad (1)$$

2. Определяют погрешности отдельных измерений.

$$\Delta x_i = x_i - \langle x \rangle. \quad (2)$$

3. Вычисляют *среднеквадратичное отклонение* среднеарифметического значения.

$$S_{\langle x \rangle} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta x_i^2}{n(n-1)}}. \quad (3)$$

4. Доверительный интервал случайной погрешности (без учета знака) находят по формуле

$$\Delta x = t_{\alpha, n} \cdot S_{\langle x \rangle}, \quad (4)$$

где  $t_{\alpha, n}$  – коэффициент Стьюдента для доверительной вероятности  $\alpha$  и числа опытов (находят по приложению).

5. Результат представляют в следующем виде:

$$x = \langle x \rangle \pm \Delta x, \text{ ед. изм.}; \quad \varepsilon = \frac{\Delta x}{\langle x \rangle} \cdot 100\%.$$

**Погрешности косвенных измерений. Случай одной переменной.** Часто оказывается, что искомая величина есть некоторая функция измеряемых величин.

Пусть искомая величина  $F$  есть некоторая известная функция прямо измеренной величины  $x$ , погрешность которой  $\Delta x$  определена, т.е.  $F = f(x)$ .

Предполагая величину  $\Delta x$  малой, погрешность величины  $F$  можно найти как приращение функции:

$$\Delta F = f'_x(x) \cdot \Delta x, \quad (5)$$

где  $f'_x(x)$  – производная функции  $f(x)$  по  $x$ .

**Погрешности косвенных измерений. Случай нескольких переменных.** Пусть искомая величина  $F$  есть известная функция нескольких переменных  $x, y, \dots$ , погрешности которых  $\Delta x, \Delta y, \dots$  определены ранее:

$$F = f(x, y, \dots).$$

Тогда по правилам дифференцирования получаем следующие формулы:

$$\Delta F_x = f'_x(x) \cdot \Delta x, \quad \Delta F_y = f'_y(x) \cdot \Delta y, \quad \dots \quad (6)$$

где  $f'_x(x), f'_y(x), \dots$  – частные производные функции  $F = f(x, y, \dots)$  по переменным  $x, y$  и т. д. Величины  $\Delta F_x, \Delta F_y, \dots$  нужно рассматривать как *частные погрешности*, возникающие за счет погрешности каждого аргумента в отдельности.

Однако для анализа полученных результатов используются не сами погрешности, а их предельные значения, которые пропорциональны среднеквадратичным отклонениям. Поэтому согласно правилу сложения дисперсий независимых величин

необходимо суммировать не сами частные погрешности, а их квадраты:

$$\Delta F = \sqrt{(\Delta F_x)^2 + (\Delta F_y)^2 + \dots} \quad (7)$$

Рекомендуется следующий порядок расчета погрешностей:

1. Определяют погрешности прямых измерений.
2. Находят частные производные и определяют частные погрешности искомой величины по формуле (6).
3. Результирующую погрешность находят по формуле (7).

**Метод логарифмирования.** Если аргументы входят в расчетную формулу только в виде произведений или частных в некоторой степени, то расчет погрешностей можно упростить. Пусть задана функция

$$F = \frac{x \cdot y^\alpha}{z^\beta}.$$

Прологарифмируем эту формулу

$$\ln F = \ln x + \alpha \cdot \ln y + \beta \cdot \ln z. \quad (8)$$

Учитывая, что дифференциал от натурального логарифма обратен его аргументу,

$$d(\ln x) = \frac{dx}{x}.$$

Тогда выражение относительной погрешности получается в виде

$$\varepsilon_F = \sqrt{\left(\frac{\partial(\ln F)}{\partial x} \Delta x\right)^2 + \left(\frac{\partial(\ln F)}{\partial y} \Delta y\right)^2 + \left(\frac{\partial(\ln F)}{\partial z} \Delta z\right)^2}.$$

Получим явный вид уравнения

$$\varepsilon_F = \frac{\Delta F}{\langle F \rangle} = \sqrt{\left(\frac{\Delta x}{x}\right)^2 + \left(\frac{\alpha \Delta y}{y}\right)^2 + \left(\frac{\beta \Delta z}{z}\right)^2}.$$

В указанном случае рекомендуется следующий порядок расчета.

1. Находят относительные погрешности аргументов:

$$\varepsilon_x = \frac{\Delta x}{x}; \quad \varepsilon_y = \frac{\Delta y}{y}; \quad \varepsilon_z = \frac{\Delta z}{z}. \quad (9)$$

2. Производят суммирование относительных погрешностей (с учетом показателей степени):

$$\varepsilon_F = \sqrt{(\varepsilon_x)^2 + (\alpha \varepsilon_y)^2 + (\beta \varepsilon_z)^2}. \quad (10)$$

3. Находят погрешность величины  $F$  по формуле

$$\Delta F = \langle F \rangle \cdot \varepsilon_F. \quad (11)$$

**Основные правила вычисления.** Точность производимых в эксперименте вычислений должна соответствовать точности измерений. Рассмотрим два числа: 0.0204 и 0.02040 . Эти два числа имеют различную *точность записи*. Точность числа определяется числом *значащих цифр*. *Значащей цифрой* приближённого числа в десятичной записи называется любая цифра, кроме нулей, расположенных слева от первой ненулевой цифры.

Абсолютная погрешность записи числа равна половине единицы последнего приведенного в записи разряда. Так, число 0,0204 могло получиться округлением любого числа в интервале  $0,0204 \pm 0,00005$ .

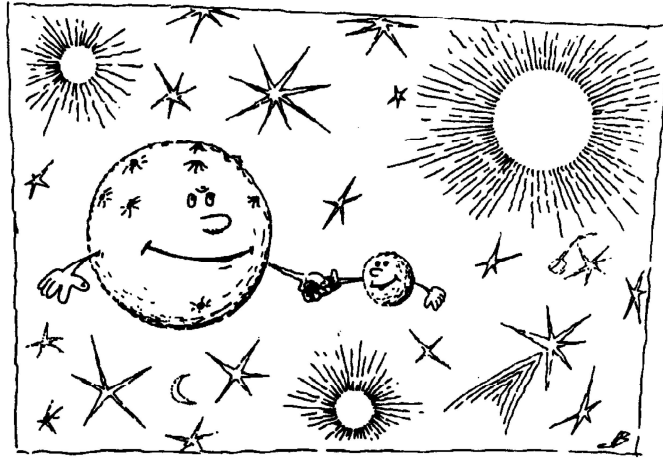
В больших числах нули справа могут служить как для указания значащих цифр, так и для определения разряда числа. Так, число 689000 в указанной записи может иметь от трех до шести значащих цифр. Поэтому большие числа рекомендуется представлять в виде числа порядка единицы с соответствующей степенью числа 10 (нормализованный вид:  $X,XX \cdot 10^y$ ). Указанное выше число следует записать в виде  $6,89 \cdot 10^5$ , если оно имеет три значащие цифры, или  $6,8900 \cdot 10^5$ , если оно имеет пять значащих цифр. Таким же образом следует записывать и малые числа:  $0,00204 = 2,04 \cdot 10^{-3}$ . Указанное правило облегчает вычисления с большими и малыми числами.

#### Примеры записи результата

Правильно	Неправильно	Ошибка
$1,2 \pm 0,2$	$1,244 \pm 0,2$	Лишние цифры в значении результата
$1,24 \pm 0,03$	$1,2438 \pm 0,0325$	Лишние цифры в значении погрешности
$1,244 \pm 0,014$	$1,244 \pm 0,01$	Грубое округление погрешности
$1,24 \pm 0,03$	$1,24 \pm 3 \cdot 10^{-2}$	Множитель $10^n$ должен быть общим

**Погрешности при невоспроизводимых косвенных измерениях [8].** Существуют методы косвенного измерения, когда наблюдения непосредственно измеряемых величин при их повторении невоспроизводимы. Результаты наблюдений одних и тех же величин при повторении опыта различны, и это различие нельзя оправдать наличием случайной погрешности. Оно происходит из-за того, что для наблюдения взяты разные объекты или следствие изменившихся условий опыта.





## ПРИЛОЖЕНИЕ

---

### Схема оформления отчета

Лабораторная работа № N  
*Название лабораторной работы*

Цель работы:.....

Оборудование:.....

*Основы теории (краткий конспект)*

- 1) теория изучаемого явления;
- 2) основные понятия, формулы;
- 3) вывод рабочей формулы;
- 4) указать основные постоянные величины.

Приготовить таблицы.

*Таблица средств измерений:*

Наименование прибора	Предел измерения	Класс точности	Цена деления	Приборная погрешность

*Таблица результатов измерений:*


*Вычисления* (следует привести математические вычисления физических величин и их погрешностей).

*Графики*, на которых приводятся зависимости между физическими величинами, приводят на миллиметровой бумаге.

*Результаты и выводы по лабораторной работе.*

Таблица П.1

**Основные физические постоянные**

Нормальное ускорение свободного падения	$g = 9,81 \text{ м/с}^2$
Постоянная Авогадро	$N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$
Молярная газовая постоянная	$R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$
Постоянная Больцмана	$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$

Таблица П.2

**Основные и дополнительные единицы тепловых и механических величин**

Наименование величины (символ)	Единица		
	обозначение	наименование	определение
1	2	3	4
Термодинамическая температура ( $T$ )	К	кельвин	Кельвин равен $1/273,16$ части термодинамической температуры тройной точки воды
Количество вещества ( $\nu$ )	моль	моль	Моль равен количеству вещества системы, содержащей столько же структурных элементов, сколько содержится атомов в углероде-12 массой $0,012 \text{ кг}$
Количество теплоты ( $Q$ )	Дж	джоуль	Джоуль равен количеству теплоты, эквивалентному работе $1 \text{ Дж}$
Теплоемкость системы ( $c$ )	Дж/К	джоуль на кельвин	Джоуль на кельвин равен теплоемкости системы, температура которой повышается на $1 \text{ К}$ при подведении к системе количества теплоты $1 \text{ Дж}$
Энтропия системы ( $S$ )	Дж/К	джоуль на кельвин	Джоуль на кельвин равен изменению энтропии системы, которой при температуре $N \text{ К}$ в изотермическом процессе сообщается количество

			теплоты $N$ Дж
Окончание табл. П.2			
1	2	3	4
Давление ( $p$ )	Па	паскаль	Паскаль равен давлению, вызываемому силой 1 Н, равномерно распределенной по нормальной к ней поверхности площадью 1 м <sup>2</sup>
Работа ( $A$ )	Дж	джоуль	Джоуль равен работе, совершаемой при перемещении точки приложения силы 1 Н на расстояние 1 м в направлении действия силы
Динамическая вязкость ( $\eta$ )	Па·с	паскаль-секунда	Паскаль-секунда равна динамической вязкости среды, касательное напряжение в которой при ламинарном течении и при разности скоростей слоев, находящихся на расстоянии 1 м по нормали к направлению скорости, равной 1 м/с, равно 1 Па
Кинематическая вязкость ( $\nu$ )	м <sup>2</sup> /с	квадратный метр на секунду	Квадратный метр на секунду равен кинематической вязкости, при которой динамическая вязкость среды плотностью 1 кг/м <sup>3</sup> равна 1 Па·с

Таблица П.3

**Динамическая вязкость жидкостей при температуре 20<sup>0</sup>С**

Жидкость	$\eta$ , мПа·с	Жидкость	$\eta$ , мПа·с
Анилин	4,4	Ацетон	0,322
Бензол	0,65	Ртуть	1,554
Вода	1,004	Спирт этиловый	1,19

Глицерин	1499	Эфир этиловый	0,243
Керосин	1,8-1,9	Масло касторовое	2,42
Масло трансформаторное	19,8	Масло подсолнечное	50,0

Таблица П.4

### Молярная масса некоторых газов

Газ	$M, \cdot 10^{-3}$ (кг/моль)
Водяной пар (H <sub>2</sub> O)	18
Воздух	28,95
Углекислый газ (CO <sub>2</sub> )	44
Азот (N <sub>2</sub> )	28
Кислород (O <sub>2</sub> )	32

Таблица П.5

### Коэффициенты Стьюдента $t_{\alpha,n}$

Число опытов $n$	Надежность $\alpha$								
	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,95	0,98	0,99	0,999
2	1,00	1,38	2,0	3,1	6,3	12,7	31,8	63,7	636,6
3	0,82	1,06	1,3	1,9	2,9	4,3	7,0	9,9	31,6
4	0,77	0,98	1,3	1,6	2,4	3,2	4,5	5,8	12,9
5	0,74	0,94	1,2	1,5	2,1	2,8	3,7	4,6	8,6
6	0,73	0,92	1,2	1,5	2,0	2,6	3,4	4,0	6,9
7	0,72	0,90	1,1	1,4	1,9	2,4	3,1	3,7	6,0
8	0,71	0,90	1,1	1,4	1,9	2,4	3,0	3,5	5,4
9	0,71	0,90	1,1	1,4	1,9	2,3	2,9	3,4	5,0
10	0,70	0,88	1,1	1,4	1,8	2,3	2,8	3,3	4,8
11	0,70	0,88	1,1	1,4	1,8	2,2	2,8	3,2	4,6
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
$\infty$	0,67	0,84	1,0	1,3	1,6	2,0	2,3	2,6	3,3

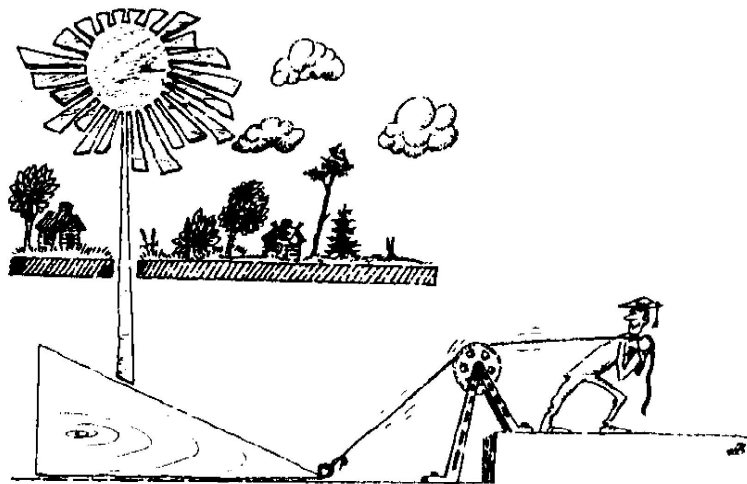
Таблица П.6

### Некоторые соотношения между единицами

Физическая величина	Соотношение между единицами
Давление	1 атм = 760 мм рт.ст. = 101325 Па
Работа и энергия	1 кал = 4,18 Дж
Объем	1 л = 10 <sup>-3</sup> м <sup>3</sup>

## Библиографический список

1. Трофимова Т.И. Курс физики: Учебное пособие для вузов.-М.:Изд. центр «Академия», 2007.-560 с.
2. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики: Учебное пособие для вузов.-М.:Высшая школа, 1989.-608 с.
3. Савельев И.В. Курс общей физики: Учебное пособие для вузов: В 5 кн. Кн. 3. Молекулярная физика и термодинамика.-М.: Наука; Физматлит, 1998.-208 с.
4. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике.-М.:Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1990.-624 с.
5. Бондарь Б.В., Калашиников Н.П., Спирин Г.Г. Курс общей физики: Учебное пособие для вузов: В 3 т. -М.:Высш. школа, 2005.-Т.3.-366 с.
6. Бондарь Б.В., Калашиников Н.П., Спирин Г.Г. Курс общей физики: Учебное пособие для вузов: В 3 т.-М.:Высш. школа, 2005.-Т.1.-352 с.
7. Калашиников Н.П., Смондырев М.А. Основы физики: Учебник для вузов: В 2 т.-М.:Изд-во «Дрофа», 2003.-Т.1.-398 с.
8. Обработка, представление, интерпретация результатов измерений: Учебное пособие/ В.В. Горлач, В.Л. Егоров, Н.А. Иванов; Под. ред. В.В. Горлача.-Омск: Изд-во СибАДИ, 2006.-83 с.



*Учебное издание*

Елена Владимировна Иванова,  
Виктор Васильевич Горлач,  
Николай Александрович Иванов

РУКОВОДСТВО  
К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ ПО ФИЗИКЕ  
(Молекулярная физика и термодинамика)

Учебно-методическое пособие

Под редакцией Е.В. Ивановой

\* \* \*

Редактор И.Г. Кузнецова

\* \* \*

Подписано в печать 22.12.2008  
Формат 60×90 1/16. Бумага писчая  
Оперативный способ печати  
Гарнитура Times New Roman  
Усл.п.л. 3,0, уч.-изд.л. 3,0  
Тираж 1000 экз. Заказ № \_\_\_\_\_  
Цена договорная

Издательство СибАДИ  
644099, Омск, ул. П.Некрасова, 10

---

Отпечатано в ПЦ издательства СибАДИ  
644099, Омск, ул. П.Некрасова, 10

