



Ю.А. Хворов, Т.Н. Астафьева, С.А. Юрченко

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО ФИЗИКЕ

(МЕХАНИКА, МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА)

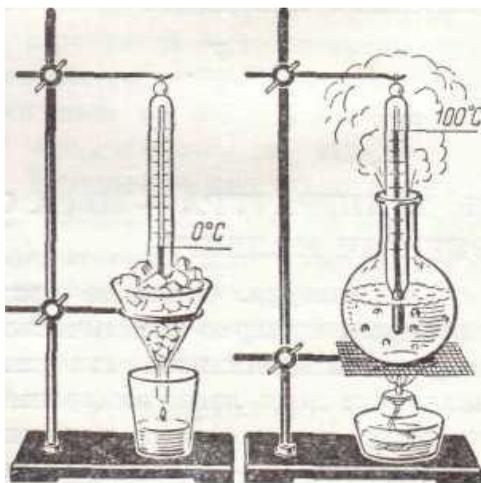
Кызыл
2020

ФГБОУ ВО «Тувинский государственный университет»

Ю. А. Хворов, Т. Н. Астафьева, С. А. Юрченко

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО ФИЗИКЕ
(механика, молекулярная физика)

2-е издание



КЫЗЫЛ
2020

УДК: 531:534:536
ББК: В3я73
Л12

Печатается по решению УМС ТувГУ
от _____ 2020 г.

Авторы–составители

Ю. А. Хворов, к.ф.-м.н., доцент кафедры физики,
Т. Н. Астафьева, к.ф.-м.н., доцент кафедры физики,
С. А. Юрченко, к.ф.-м.н., доцент кафедры физики

Рецензенты

Кунаева О.А., председатель Региональной экспертной комиссии по аттестации учителей физики, зам. председателя регионального РУМО учителей физики, зам. председателя ПЭК по физике, учитель физики высшей категории, Почётный работник образования РФ
Чооду О.А. к.т.н., доцент ТувГУ

Лабораторный практикум по физике (механика, молекулярная физика) : пособие для студентов / Ю. А. Хворов, Т. Н. Астафьева, С. А. Юрченко. - 2-е издание. - Кызыл : Изд-во ТувГУ, 2020. - 124 с. – Текст : непосредственный.

Пособие предназначено для студентов инженерно – технического факультета (направление бакалавриат) для упорядочения организации выполнения ими лабораторных работ по механике и молекулярной физике. Практикум включает описание 12 лабораторных работ, задания и методические указания к их выполнению.

© Ю.А. Хворов, 2020
© Т.Н. Астафьева, 2020
© С.А. Юрченко, 2020
© ТувГУ, 2020

Содержание

Введение	4
Общие вопросы обработки результатов измерений. О погрешностях измерений физических величин.....	6
Работа № 1. Измерение линейных размеров тел	11
Работа № 2. Определение плотности тел	18
Работа № 3. Изучение поступательного равноускоренного движения тел.....	22
Работа № 4. Изучение вращательного равноускоренного движения тел.....	29
Работа № 5. Изучение неупругого удара и определение скорости пули с помощью баллистического маятника.....	36
Работа № 6. Измерение коэффициента вязкости жидкости методом Стокса.....	44
Работа № 7. Определение постоянной Больцмана	55
Работа № 8. Определение отношения теплоёмкостей C_p/C_v воздуха методом адиабатического расширения	62
Работа № 9. Определение удельной теплоёмкости твердого тела.....	71
Работа № 10. Определение поверхностного натяжения жидкости способом Ребиндера	77
Работа № 11. Определение коэффициента внутреннего трения и средней длины свободного пробега молекул воздуха	86
Работа № 12. Фазовые явления и определение влажности воздуха.....	92
Литература.....	106
Приложения.....	108

Введение

Инженер должен хорошо знать основы физики и уметь творчески применять физические законы в своей практической деятельности. В этом плане вниманию студентов инженерно-технического факультета (бакалавриат) предлагается лабораторный практикум по механике и молекулярной физике, так как лишь в лаборатории студенты напрямую знакомятся в курсе физики с экспериментальной работой.

Задача лабораторного практикума преследует следующие цели:

- 1) практическим путем закрепить и углубить знания по физике, полученные на лекциях;
- 2) освоить методы и приемы физических измерений;
- 3) получить и развить навыки самостоятельной работы и умения применять теоретические знания для решения практических задач;
- 4) приобрести опыт математической обработки результатов измерений и умения проводить анализ полученных экспериментальных данных.

Очень важно студенту уяснить цель работы, т.е. понять для чего каждое конкретное физическое явление, закон, физическая величина изучаются в данной работе. Что нужно определить и как проверить на опыте? Каково устройство приборов и в чем состоит принцип действия экспериментальной установки в каждой лабораторной работе? Нужно найти ответы на все эти вопросы по каждой работе и подготовить отчет. Именно в этом деле студент получает драгоценные навыки работы в физической лаборатории.

В ходе выполнения лабораторного практикума и освоения правил техники безопасности необходимо:

- 1) познакомиться с теорией вопроса предстоящей лабораторной работы;
- 2) выписать и уяснить необходимые формулы;
- 3) начертить схему установки и подготовить таблицы для записи экспериментальных данных;
- 4) изучить порядок проведения лабораторной работы;

5) четко представлять цель и последовательность проведения эксперимента, чтобы суметь потом сделать правильные выводы по результатам измерений.

Подготовка к лабораторным занятиям определяется из числа часов самостоятельной работы в читальных залах и дома.

При этом особенно важно - понимание роли эксперимента в физике, умение выделять главное, существенное. Студент должен уметь находить в ходе эксперимента и в справочной литературе параметры, определяющие данное явление, делать качественные выводы при переходе к предельным условиям. Ему надо знать фундаментальные физические постоянные и уметь делать правильные выводы из сопоставления теории и эксперимента. При осуществлении измерений важно выработать в себе критическое отношение к оценке результатов измерений.

В начале каждого занятия в лаборатории студент должен получить после собеседования с преподавателем допуск к выполнению лабораторной работы и предъявить для нее форму отчета.

Приступая к изучению электрической цепи, прежде всего, следует выяснить, какой прибор соответствует каждому элементу схемы. Сборку цепи ведут вдоль последовательного замкнутого контура, начиная от одной клеммы выключенного источника тока и заканчивая другой. После этого подсоединяют параллельные участки цепи. По окончании сборки схемы, не включая источник тока, устанавливают пределы измерения электроизмерительных приборов в соответствии с величинами, задаваемыми лабораторной работой. Собранная цепь и параметры приборов должны быть проверены преподавателем или лаборантом.

После проверки собранной установки студент проводит необходимые измерения. Полученные данные с указанием единиц измерения он заносит в таблицу результатов.

Проделав все необходимые измерения, студент далее производит расчеты для всех искомых величин (в СИ). Результаты расчетов он показывает преподавателю и, убедившись в их правильности, разбирает установку.

Каждую выполненную и оформленную работу студент представляет к защите, в ходе которой он должен кратко изложить задачи исследования, особенности методики эксперимента, результаты измерений и расчетов, а также данные о погрешностях измерений. В заключение – делает выводы об итогах выполнения данной лабораторной работы.

Отчет по каждой лабораторной работе должен содержать:

1. Номер, название работы и её цель.
2. Приборы и принадлежности.
3. Описание краткой теории и методики эксперимента.
4. Схему установки.
5. Таблицы с экспериментальными результатами.
6. Расчеты физической величины, определяемой в работе.
7. Графики, отражающие результаты измерений и расчетов.
8. Расчеты ошибок измерений (погрешности).
9. Ответы на контрольные и другие вопросы по работе.
10. Выводы.

При подготовке к защите отчета по лабораторной работе студент пользуется, кроме настоящего руководства и полученных результатов, различными литературными источниками, получает необходимые консультации у преподавателя. В ходе подготовки к защите лабораторной работы он отвечает также на контрольные вопросы.

Описания лабораторных работ сделаны на основе модернизации указаний и рекомендаций, приведенных в существующих лабораторных практикумах по физике под редакцией Л.А.Гольдина (1983 г.), А.С.Ахматова (1980 г.), Пронина В.П. (2005 г.) и других авторов.

Общие вопросы обработки результатов измерений. О погрешностях измерений физических величин

Для оценки результатов измерений той или иной физической величины применяется *Международная система единиц (СИ)*, в которой основными единицами измерений являются:

длина – метр (м);
масса – килограмм (кг);
время - секунда (с);
термодинамическая температура – кельвин (К);
сила электрического тока – ампер (А);
сила света – кандела (кд);
количество вещества – моль (моль).
К дополнительным единицам измерений относятся:
плоский угол – радиан (рад);
телесный угол – стерадиан (ср).

Все остальные единицы – производные, то есть образованы из основных единиц. Очень часто применяются кратные и дольные единицы. При этом к наименованию исходной единицы присоединяется одна из приставок (Приложение 17).

Измерения и обработка результатов

Измерить физическую величину – это значит сравнить ее с однородной ей величиной, значение которой условно принято за единицу. *Физическая величина* – качественная и количественная характеристика свойства, признака и состояния объекта или процесса.

Проведя необходимые измерения изучаемых физических величин, данные о которых с указанием единиц измерения заносятся в таблицу, студент должен показать результаты преподавателю. Если результаты измерений не соответствуют требуемым величинам, эксперимент необходимо провести заново.

По окончании эксперимента студент приводит в порядок рабочее место и продолжает обрабатывать полученные данные (оценивает ошибки, чертит графики и делает выводы по полученным результатам).

При построении графиков необходимо соблюдать правила:

- 1) графики желательно строить на миллиметровой бумаге;

- 2) в обозначении осей записывается физическая величина и единица измерения физической величины;
- 3) при построении координат строится масштабная шкала;
- 4) каждую экспериментальную точку строят на графике по табличным данным в соответствии с выбранным масштабом;
- 5) при построении графика его линию следует проводить плавно с учётом расположения точек на чертеже.

Чтобы отразить погрешности измерений на место экспериментальных точек ставят крестики, кружочки и другие значки таких размеров, чтобы их половинки соответствовали по масштабу погрешности измерения данной величины.

Измерения делятся на две группы: прямые и косвенные.

В случае *прямых* измерений определяемая величина сравнивается с единицей измерения непосредственно или с помощью измерительного прибора, проградуированного в соответствующих единицах. К таким измерениям, в частности, относится: измерение длины линейкой, штангенциркулем, микрометром т.д. А в случае электрических и магнитных величин – с помощью мультиметра и пр. Значение измеряемой величины отсчитывается по шкале измерительного прибора или считываются с дисплея мультиметра.

При *косвенных* измерениях искомая величина определяется из результатов прямых измерений других величин, которые связаны с измеряемой величиной определяемой функциональной зависимостью. Например, измерения сопротивления, напряженности и индукции электрического и магнитного полей, магнитного потока и др.

Измерение любой физической величины можно условно разделить на четыре последовательно выполняемые операции:

- 1) проверка измерительного прибора;
- 2) фиксация показания результата измерения;
- 3) вычисление искомой величины из результатов измерений;
- 4) оценка погрешностей.

Любые измерения могут быть выполнены лишь приближенно. Это связано как с принципиально ограниченной возможностью точности измерения, так и с природой самих измеряемых объектов.

Погрешность, вносимая прибором при каждом отдельном измерении (приборная погрешность), связана с точностью прибора, т.е. чем выше точность, тем меньше погрешность измерений.

Например, толщина пластинки измеряется линейкой с миллиметровыми делениями с погрешностью 0,5 мм, штангенциркулем – 0,05 мм, микрометром – 0,005 мм, которые отражают их абсолютные погрешности измерений.

Повторные измерения одной и той же величины дают в общем случае результаты, несколько отличающиеся друг от друга даже тогда, когда они производятся одним и тем же лицом, одним и тем же способом, посредством одних и тех же приборов.

Погрешности разделяются на две группы: систематические и случайные.

Систематические погрешности связаны с ограниченной точностью прибора, с неправильным выбором метода измерений и другими, в общем, известными факторами, и поэтому в принципе могут быть исключены, хотя не всегда это просто сделать.

Случайные погрешности вызываются большим числом случайных причин, действия которых различны и не могут быть заранее учтены. Типичный пример такой погрешности – ошибка параллакса. Чтобы избежать параллакса для правильного отсчета деления шкалы нужно, глаз наблюдателя располагать перпендикулярно к шкале и к стрелке прибора. В противном случае, результат будет либо завышенный, либо заниженный.

Хотя исключить все случайные погрешности отдельных измерений невозможно, математическая теория случайных явлений позволяет уменьшить их до разумных пределов. Для этого используются понятия **среднего арифметического** из серии n – измерений и **средней квадратичной погрешности**.

Пусть в результате измерений получены значения какой-то величины A . Все значения A_i являются приближенными. **Среднее арифметическое** A_{cp} вычисляют по формуле

$$A_{cp} = \frac{A_1 + A_2 + \dots + A_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_i. \quad (1)$$

Для исключения случайных ошибок и повышения степени точности необходимо всегда провести несколько измерений, а затем найти их среднее арифметическое.

Допустим, что $A_{\text{ист}}$ – известное точное значение искомой величины, тогда каждая из разностей

$$\begin{aligned}\Delta A_1 &= |A_1 - A_{\text{ист}}| \\ \Delta A_2 &= |A_2 - A_{\text{ист}}| \\ \Delta A_n &= |A_n - A_{\text{ист}}|\end{aligned}\quad (2)$$

определяет абсолютную ошибку измерения, то есть

$$\Delta A_i = |A_i - A_{\text{ист}}| \quad (i = 1, 2, \dots, n). \quad (3)$$

Разность между истинным и измеренным значениями искомой величины называется абсолютной погрешностью ΔA .

Однако истинное значение, как правило, неизвестно, поэтому под *абсолютной погрешностью* можно понимать разность

$$\Delta A_i = |A_i - A_{\text{cp}}| . \quad (4)$$

Следовательно,

$$\Delta A_{\text{cp}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\Delta A_i|. \quad (5)$$

Отношение абсолютной погрешности к действительному значению измеренной величины называется *относительной погрешностью* ε .

Абсолютная ошибка характеризует качество измерений, а точность измерений определяется относительной ошибкой (погрешностью), выражаемой в процентах

$$\varepsilon = \frac{\Delta A_{\text{cp}}}{A_{\text{cp}}} \times 100\%. \quad (6)$$

Более глубокое изучение теории погрешностей можно найти в книгах:

1. Божаев, П. Х. Руководство по обработке результатов лабораторных работ по физике. – Москва : МТИ, 1966. – 35 с. – Текст : непосредственный.

2. Пронин, В. П. Практикум по физике. – Санкт - Петербург : Лань, 2005. – 256 с. - Текст : непосредственный.

3. Гольдин, Л.Л. Лабораторный практикум по физике: учебное пособие для студентов вузов / Л.Л.Гольдин, Ф.Ф.Игошин, С.М.Козел и др. – Москва : Наука, 1983. - § 1. - Текст : непосредственный.

4. Schilling, H. Statistische Physic in Beispilen. – Leipzig 1972; Шиллинг, Г. Статистическая физика в примерах : перевод с немецкого – Москва : Мир, 1976, гл. 1. - §§ 1, 2. - Текст : непосредственный.

5. Гринкруг, М. С. Лабораторный практикум по физике : учебное пособие / М. С. Гринкруг, А. А. Вакулюк. – Санкт-Петербург : Лань, 2012. – 480 с. – Текст : непосредственный.

Работа №1. ИЗМЕРЕНИЕ ЛИНЕЙНЫХ РАЗМЕРОВ ТЕЛ

Цель работы: ознакомиться с измерительными инструментами и правилами пользования ими.

Приборы и принадлежности: масштабная линейка, штангенциркуль, микрометр, тела различной формы, размеры и объёмы которых необходимо определить, набор проволок.

Краткие теоретические сведения

Умение измерять линейные и угловые величины с различной степенью точности (величина обратная относительной погрешности), допустимой механическими средствами, входит как необходимое условие в большинстве работ, связанных с физической и технической практикой. Наиболее точные приборы снабжаются нониусами или микровинтами.

Нониусы. Нониусом (линейным или круговым) называется специальная шкала, дополняющая обычный масштаб и позволяющая повысить точность измерений в 10-20 раз.

Линейный нониус. Измеряя длину какого-либо тела миллиметровым масштабом, можно поручиться за цифры,

обозначающие число целых миллиметров. Относительно десятых долей миллиметра можно только сказать, что при оценке на глаз максимальная ошибка не превосходит половины цены деления шкалы, то есть половины её наименьшего деления. Таким образом, максимальная ошибка равна 0,5 мм.

Для того, чтобы можно было поручиться при измерениях и за десятые доли миллиметра, пользуются нониусом. Линейный нониус – это небольшая шкала, разделенная на 10, 20, 25 или 50 делений, способная скользить вдоль основной шкалы. Указанные деления наносятся так, что $N - 1$ делений основной шкалы равняется по длине N делениям нониуса. Если a_M и a_N - цены делений нониуса и основной (масштабной) шкалы, то

$$N a_N = (N-1) a_M. \quad (1)$$

Разность этих делений, называемая точностью нониуса, равна

$$a_M - a_N = \frac{a_M}{N}. \quad (2)$$

Если, например, основная шкала разделена на миллиметры, а на нониусе 25 делений, то мерой его точности будет величина равная 0,04 мм.

Для измерения с помощью линейного нониуса необходимо к первому делению основной шкалы приложить один конец измеряемого тела, а к другому концу тела – нониус. Пусть конец предмета находится между m и $m+1$ делениями основной шкалы, причем n -е деление нониуса совпадает с каким-либо делением шкалы (рис.1).

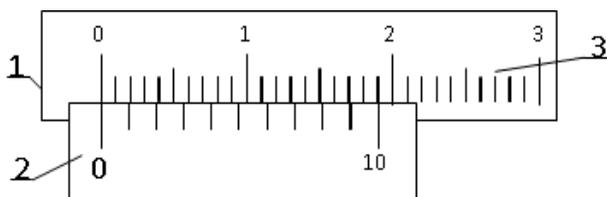


Рис. 1. Линейка с нониусом.

1 – линейка; 2 – нониус; 3 - масштаб.

Длина предмета

$$l = m a_M + \Delta. \quad (3)$$

Величина Δ определяется по нониусу

$$\Delta = \frac{a_M}{N} \times n. \quad (4)$$

Таким образом, длина предмета равна

$$\ell = \left(m + \frac{n}{N}\right) \times a_M. \quad (5)$$

Пример (см. рис.1): $a_M = 1$ мм; $N = 10$ дел.; $m = 10$ мм; $n = 7$ дел.

$$\ell = \left(\left(10 + \frac{7}{10}\right) \times 1\right) = 10,7 \text{ мм}. \quad (6)$$

Практическое правило пользования линейкой с нониусом заключается в том, что длина предмета равна числу целых делений основной шкалы, расположенных слева от нулевого деления нониуса, плюс величина отсчёта по нониусу, умноженная на точность нониуса.

Штангенциркуль. Он служит для линейных измерений, не требующих высокой точности. Отсчётным приспособлением у всех конструкций штангенциркулей служит шкала штанги и линейный нониус (рис. 2).

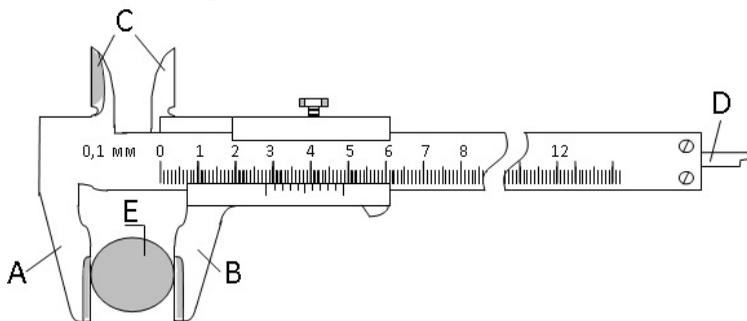


Рис. 2. Измерение штангенциркулем диаметра цилиндра.

A – неподвижная планка; **B** – подвижная планка; **C** – выступы; **D** – рейка; **E** – цилиндр.

Цена деления основной шкалы (её наименьшее деление) равна обычно 1 мм. Погрешность нониусов обычно равна: 0,2 мм; 0,1 мм; 0,05 мм. Нониус укреплен в подвижной рамке, скользящей вдоль основной шкалы штанги. При нулевом показании

инструмента ноль нониуса совпадает с нулевым штрихом основной шкалы. При измерении детали подвижная рамка **В** с нониусом смещается, и деталь зажимается губками **А** и **В** штангенциркуля. Существует несколько видов штангенциркулей. Они отличаются типом и количеством измерительных губок, длиной штанги, типом нониусов или наличием некоторых вспомогательных деталей. При наличии у штангенциркулей верхних **С** и нижних **А** и **В** измерительных губок, его можно применить как для внутренних измерений, так и для внешних. Часто штангенциркуль снабжается линейкой **Д**, служащей для измерений глубин отверстий.

Чтобы измерить размеры тела (цилиндр **Е**), его помещают между планками **А** и **В** и делают отсчёт, то есть определяют число целых делений основной шкалы, расположенных слева от нулевого деления нониуса, и номер деления шкалы нониуса, наиболее точно совпадающего с чётко видимым делением основной шкалы. Зная число делений основной шкалы и нониуса, производят отсчёт. При измерении диаметра отверстий используются выступы **С**, а при измерении глубины отверстий – рейка **Д**.

Штангенциркули могут различаться особенностями конструкций и наличием вспомогательных приспособлений.

Микрометр. Для более точных измерений применяют микрометрические инструменты. Микрометр предназначен для измерения размеров тел с абсолютной погрешностью 0,01 мм. Наиболее распространённым является микрометр, изображённый на рис. 3.

Микрометр состоит из стальной скобы (**1**), левый конец его снабжён упором (**2**), а правый конец имеет микрометрический винт (**3**) и неподвижную шкалу (**5**) с делениями, равными 0,5 мм. Шаг винта равен 0,5 мм. Винт соединён с барабаном (**6**), на котором расположена шкала, содержащая 50 делений. Поворот винта на одно деление подвижной шкалы соответствует его перемещению на 0,01 мм. Эта величина и составляет точность прибора и указывается на его корпусе.

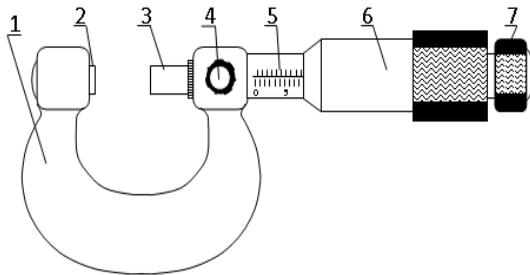


Рис. 3. Схема микрометра.

1 - скоба; 2 - упор; 3 - микрометрический винт; 4 - зажим; 5 - неподвижная шкала; 6 - барабан с подвижной вращающейся шкалой; 7 - ручка с трещоткой.

Перед началом измерений следует освободить микрометрический винт от зажима (4) и проверить совпадение нулевых штрихов барабана и подвижной шкалы при соприкосновении упора (2) с винтом (3). Если штрихи не совпадают, необходимо обратиться к лаборанту или преподавателю, которые помогут установить «нуль» микрометра.

Измеряемое тело помещают между упором (2) и винтом (3). Винт при этом следует вращать только с помощью ручки (7) с «трещоткой», которая снабжена устройством, обеспечивающим определённое давление на измеряемое тело. Размеры тела определяются суммой показаний, получаемых на неподвижной шкале (5) и подвижной (6). Показание на неподвижной шкале определяется произведением числа L целых делений этой шкалы, соответствующих данному измерению, на 0,5 мм: $L \times 0,5$ мм. Цена деления шкалы барабана может быть установлена следующим образом: если шаг микровинта (линейное перемещение барабана на один оборот) $h = 0,5$ мм, а число делений на круговой шкале барабана $n = 50$, то цена деления круговой шкалы $a = h / n = 0,01$ мм. Показание на подвижной шкале определяется произведением значения числа K на положении этой шкалы относительно осевой линии на 0,01 мм: $K \times 0,01$ мм. Складывая эти два показания, находят результирующую измеряемую величину размера тела.

$$l = L \times 0,5 \text{ мм} + K \times 0,01 \text{ мм}. \quad (7)$$

В качестве *примера* возьмём показание микрометра, изображённого на рис. 3, где $L = 13$, $K = 43$. В итоге, искомый размер тела равен

$$l = 13 \times 0,5 \text{ мм} + 43 \times 0,01 \text{ мм} = 6,93 \text{ мм}. \quad (8)$$

Микрометры изготавливаются с пределами измерений 0 – 25; 50; 75; и так далее до 1600 мм.

Измерения и обработка результатов

Задание 1. Измерьте штангенциркулем размеры l , d , h тела, необходимые для определения его объёма V .

Измерения сделать не менее трёх раз.

Задание 2. Запишите формулу для расчёта объёма тела и вычислите объём данного тела.

Найдите среднее значение объёма тела по формуле

$$V_{\text{ср}} = (V_1 + V_2 + V_3) / 3. \quad (9)$$

Результаты измерений и вычислений внесите в таблицу 1.

Таблица 1. Результаты измерений объёма тела.

Тело	l (длина), мм	d (ширина), мм	h (высота), мм	V (объём тела), мм ³
1				
2				
3				

Задание 3. Измерьте диаметры набора проволок микрометром.

Результаты измерений внесите в таблицу 2.

Таблица 2. Результаты измерений диаметра проволок.

№ п/п	Диаметры проволок	d ₁ , мм	d ₂ , мм	d ₃ , мм	d ₄ , мм	D ₅ , мм	d _{ср} , мм
1							
2							
3							

Задание 4. Определите абсолютную и относительную погрешности измерений объёма тела V и диаметра проволоки d .

Результаты измерений обработать в соответствии с правилами приближённых вычислений и теорией погрешностей.

Представить результаты в системе СИ

$$V = V_{\text{ср}} \pm \Delta V_{\text{ср}}, \quad (10)$$

$$d = d_{\text{ср}} \pm \Delta d_{\text{ср}}. \quad (11)$$

Сделайте вывод, подготовьте отчёт.

Контрольные вопросы

1. Основные приборы для измерения линейных размеров тел.
2. Как определяют цену деления измерительных приборов?
3. Как устроен штангенциркуль?
4. Принцип работы и устройство микрометра.
5. В каких случаях следует пользоваться штангенциркулем, а в каких - микрометром?
6. Что такое абсолютная погрешность?
7. Что такое относительная погрешность?

Литература

1. Грабовский, Р. И. Курс физики : учебное пособие - Санкт – Петербург : Лань, 2009. - 608 с., гл. 7. - С. 115 - 123. - Текст : непосредственный.
2. Детлаф, А. А. Курс физики : учебное пособие для студентов вузов / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский. – Москва : Академия, 2005. – 720 с., гл. 12. - С. 169 – 178. – Текст : непосредственный.
3. Зисман, Г. А. Курс общей физики : учебное пособие : [в 3-х томах] / Г. А. Зисман, О. М. Годес. – Санкт-Петербург : Лань, 2011. - Т. 1. Механика. Молекулярная физика. Колебания и волны. – 352 с., гл. 10. – С. 187 – 210. – Текст : непосредственный.
4. Макаренко, Г. М. Физика. - Минск : Дизайн ПРО, 1997. – Т. 1 Механика. Основы молекулярной физики и термодинамики. - 176 с., гл. 12. - Текст : непосредственный.
5. Савельев, И. В. Курс общей физики: учебное пособие для студентов вузов : [в 3-х томах]. – Санкт – Петербург : Лань,

2005. – Т.1. Механика. Молекулярная физика 432 с., гл. 15. – С. 383 - 400. – Текст : непосредственный.

6. Трофимова, Т. И. Физика в таблицах и формулах. – Москва : Дрофа, 2002. – 432 с., гл. 2.3.13. - 2.3.14. – С. 122. - Текст : непосредственный.

Работа № 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ТЕЛ

Цель работы: определение плотности тел методом гидростатического взвешивания.

Приборы и принадлежности: технические весы с разновесами, коробка с песком, подставка, мензурка с дистиллированной водой, твёрдое тело, динамометр, штангенциркуль.

Краткие теоретические сведения

Плотность однородного тела можно вычислить по формуле

$$\rho = m / V, \quad (1)$$

где m - масса тела, V - его объём.

Следовательно, для определения плотности тела надо знать его массу и объём.

Массу тела находят взвешиванием на рычажных весах. Объём тела вычисляют, если тело имеет правильную форму, или определяют с помощью мензурки с водой.

На тело, находящееся в жидкости, в обычных земных условиях действуют две противоположно направленные силы: сила тяжести и архимедова сила.

Архимедова сила. Зависимость давления в жидкости от глубины приводит к возникновению выталкивающей силы, действующей на любое тело, погружённое в жидкость. Эту силу называют *архимедовой силой*.

Если прямоугольный параллелепипед высотой h и площадью основания S погружён в жидкость плотностью ρ , то силы давления жидкости на его боковые грани уравниваются, а равнодействующая сил давления снизу F_2 и сверху F_1 (рис. 1) отлична от нуля и является архимедовой силой

$$F_A = F_2 + F_1, \quad (2)$$

модуль которой равен

$$F_A = p_2 S - p_1 S = \rho g h_2 S - \rho g h_1 S = \rho g S (h_2 - h_1) = \rho g Sh. \quad (3)$$

Так как $Sh = V$, а $\rho V = m$, то $F_A = mg$, где m - масса вытесненной жидкости.

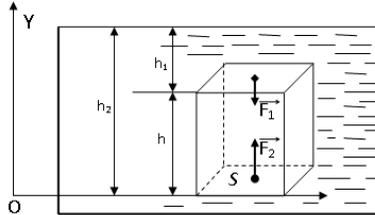


Рис.1. Определение выталкивающей (архимедовой) силы при полном погружении тела.

Архимедова сила: сила, выталкивающая погружённое в жидкость тело, равна весу жидкости, вытесненной телом

$$F_A = mg = \rho Vg, \quad (4)$$

где ρ - плотность жидкости, V - объём части тела, погружённого в жидкость, g - ускорение свободного падения ($g = 9,81 \text{ м/с}^2$).

Архимедова сила направлена противоположно силе тяжести. Поэтому вес тела при взвешивании в жидкости оказывается меньше веса, измеренного в вакууме (воздухе).

Описание эксперимента Правила взвешивания

1. Прежде, чем пользоваться весами, следует убедиться в том, что они исправны (чашки симметрично подвешены к серёжкам, серёжки точно установлены на призмы, коромысло не перекошено). Для проверки этого следует плавно открыть арретир и пронаблюдать качание стрелки весов. Если стрелка весов, совершая колебания, отклоняется право и влево от «0» на примерно равное число делений шкалы, то такие весы можно считать исправными.

2. Помещать чашки весов и снимать с них тело и разновески можно только при закрытом арретире.
3. Открывать и закрывать арретир нужно осторожно и плавно. Успокаивать качание чашки можно лёгким прикосновением листка бумаги.
4. Полностью открывать арретир можно только тогда, когда весы близки к положению равновесия. Для этого нужно, открыв арретир наполовину и отметив, что стрелка без колебаний идёт вправо или влево, закрыть арретир и изменить массу гирь.
5. Центр тяжести тел и гирь должен, по возможности, находиться в центре чашки весов. Для удобства тело кладут на левую чашку, а гири - на правую.
6. Разновески надо брать только пинцетом, после снятия с весов их следует вернуть на свое место в коробку.
7. Подбор гирь при взвешивании надо начинать с крупных разновесов - более близких к массе тела, а потом использовать мелкие гири.

Измерения и обработка результатов

Задание 1. Найдите массу предложенного тела взвешиванием на весах.

Задание 2. Найдите объём тела.

Измерьте штангенциркулем размеры l (длина), d (ширина), h (высота) тела, необходимые для определения его объёма V , или найдите объём тела с помощью мензурки с водой ($1л = 1 \times 10^{-3} м^3 = 1 \times 10^3 мл$)

Задание 3. Найдите плотность тела ρ .
Сравните с табличным значением.

Задание 4. Рассчитайте абсолютную $\Delta\rho$ и относительную ε погрешности определения плотности тела.

Для этого воспользуйтесь формулами

$$\Delta\rho = (V \Delta m + \Delta V m) / V^2, \quad (5)$$

$$\varepsilon = (\Delta m / m) + (\Delta V / V). \quad (6)$$

Задание 5. Запишите результат в виде

$$\rho = \rho_0 \pm \Delta\rho. \quad (7)$$

Задание 6. Исследуйте зависимость величины архимедовой силы от глубины погружения твёрдого тела в жидкость.

Эксперимент проводите, начиная с частичного погружения твёрдого тела в жидкость (рис.2), до его полного погружения.

Сделайте вывод, подготовьте отчёт.

Контрольные вопросы

1. Какими приборами можно измерять плотность твёрдых тел, жидкостей, газов?
2. Можно ли изменить плотность тела?
3. Предложите способ измерения плотности сыпучих тел (песок, цемент, мука).
4. Какую силу называют архимедовой силой?
5. Условия плавания тел.
6. В чём смысл метода гидростатического взвешивания? Почему при взвешивании в жидкости вес тела меньше, чем при взвешивании в воздухе?

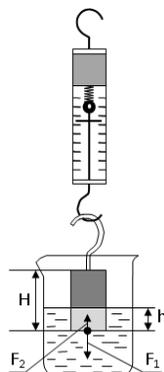


Рис. 2.

Экспериментальная установка для изучения архимедовой силы.
 H – высота тела;
 h – глубина погружения тела в жидкость

Литература

1. Грабовский, Р. И. Курс физики : учебное пособие - Санкт – Петербург : Лань, 2009. - 608 с., гл. 2. - С. 28 - 30. - Текст : непосредственный.
2. Детлаф, А. А. Курс физики : учебное пособие для студентов вузов / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский. – Москва : Академия, 2005. – 720 с., гл. 2. - С. 20 – 23. – Текст : непосредственный.
3. Зисман, Г. А. Курс общей физики : учебное пособие : [в 3-х томах] / Г. А. Зисман, О. М. Тодес. – Санкт-Петербург : Лань,

2011. - Т. 1. Механика. Молекулярная физика. Колебания и волны. – 352 с., гл. 2. – С. 21 – 30. – Текст : непосредственный.
4. Макаренко, Г. М. Физика. - Минск : Дизайн ПРО, 1997. – Т. 1 Механика. Основы молекулярной физики и термодинамики. - 176 с., гл. 2. – С. 14 – 23. - Текст : непосредственный.
5. Савельев, И. В. Курс общей физики: учебное пособие для студентов вузов : [в 3-х томах]. – Санкт – Петербург : Лань, 2005. – Т. 1. Механика. Молекулярная физика 432 с., гл. 1.19 – С. 16. – Текст : непосредственный.
6. Трофимова, Т. И. Физика в таблицах и формулах. – Москва : Дрофа, 2002. – 432 с., гл. 2.3.13. - 2.3.14. – С.122. - Текст : непосредственный.

Работа № 3. ИЗУЧЕНИЕ ПОСТУПАТЕЛЬНОГО РАВНОУСКОРЕННОГО ДВИЖЕНИЯ ТЕЛ

Цель работы: экспериментально доказать, что при равноускоренном движении тела его ускорение является величиной постоянной; экспериментально проверить справедливость второго закона Ньютона при поступательном равноускоренном движении.

Приборы и принадлежности: полуавтоматическая машина Атвуда с принадлежностями, источник питания постоянного тока (12 В, 2 А), счётчик-секундомер электронный школьный (ССЭШ).

Краткие теоретические сведения

Механические движения делятся в зависимости от конкретных условий (вида траектории) на прямолинейные и криволинейные. Всякое движение может быть равномерным и неравномерным. *Равномерным* называется движение, при котором за равные промежутки времени материальная точка (тело) проходит одинаковые пути, при этом: $V = \text{const}$, $a = 0$. Поступательное движение тела называется *равноускоренным*, если его ускорение с течением времени остаётся постоянным, то есть $V \neq \text{const}$,

$a = \text{const}$ ($a \neq 0$). Величина ускорения определяет быстроту изменения скорости тела, которая может изменяться как по величине, так и по направлению (в случае криволинейного движения тела). Если V_0 – начальная скорость тела, V – скорость тела в данный момент времени t , то его ускорение можно найти как

$$a = (V - V_0) / t. \quad (1)$$

Путь, пройденный телом при равноускоренном движении за время t , определяется уравнением

$$S = V_0 t + at^2/2. \quad (2)$$

Изучение равноускоренного движения сводится к проверке закона пути.

Для случая, когда $V_0 = 0$

$$S = a t^2 / 2. \quad (3)$$

Определяя пути S_1, S_2, S_3 и т.д., проходимые телом от начального положения за интервалы времени t_1, t_2, t_3 и т.д. получают

$$a_1 = 2S_1/t_1^2; \quad a_2 = 2S_2/t_2^2; \quad a_3 = 2S_3/t_3^2. \quad (4)$$

Если значения ускорений a_1, a_2, a_3 и т.д. окажутся равными, то можно сделать вывод: движение тела является равноускоренным.

Ускорение a тела определяется *вторым законом Ньютона*, согласно которому

$$a = F / m, \quad (5)$$

где F - результирующая сила, действующая на тело; m - масса тела.

Так как для равноускоренного движения $a = \text{const}$, то F должна быть постоянной при $m = \text{const}$.

В данной работе исследуется движение системы, состоящей из двух грузов B и A с массами m_1 и m_2 , которые подвешены на нити, перекинутой через блок (рис.1). Нить считают нерастяжимой; моментом инерции блока и трением в его оси пренебрегают.

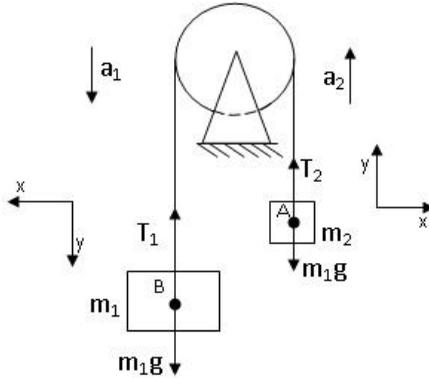


Рис.1. Система грузов **А** и **В**.

При проверке уравнения (5) необходимо, чтобы общая масса движущихся грузов оставалась постоянной, а величина действующей силы изменялась – это приведёт к изменению величины ускорения движения грузов. Так что с ростом силы ускорение будет увеличиваться. Тогда, определяя на опыте значения ускорений для различных сил, можно проверить справедливость соотношения (5). Это можно осуществить, перекладывая, например, части груза **А** (маленькие грузики) массами $\Delta m_1, \Delta m_2, \dots$ к грузу **В**. Общая масса грузов при этом не изменяется, а результирующая сила увеличивается. Полагаем, что сила натяжения нити, соединяющей грузы, на всех участках одинакова и величина ускорения грузов одна и та же

$$T_1 = T_2 = T, \quad a_1 = a_2 = a. \quad (6)$$

Находим уравнение для расчёта ускорения движения системы грузов, рассуждая следующим образом. Пусть после перекладки груза массой Δm от груза **А** к грузу **В**, массы грузов **А** и **В** стали равны m_2 и m_1 . Тогда на груз **В** будет действовать результирующая сила, определяемая силой тяжести $m_1 g$ и силой натяжения нити T_1 , а уравнение движения груза **В** (в векторной форме), согласно второму закону Ньютона, примет вид

$$m_1 g + T_1 = m_1 a_1, \quad (7)$$

где a_1 - вектор ускорения движения груза **В**.

Направив ось y системы координат, в которой движется груз B , в сторону движения груза B , записывают уравнение (7) в виде равенства

$$m_1 g - T_1 = m_1 a_1 . \quad (8)$$

Так как на груз A действует сила тяжести $m_2 g$ и сила натяжения нити T_2 , то, определяя результирующую силу для груза A , получают его уравнение движения в виде

$$m_2 g + T_2 = m_2 a_2 , \quad (9)$$

где a_2 - вектор ускорения движения груза A .

Направив ось y системы координат, в которой движется груз A , в сторону движения груза A , записывают уравнение (9) в скалярной форме

$$-m_2 g + T_2 = m_2 a_2 . \quad (10)$$

Решая совместно систему уравнений (8) и (10) с учётом равенств (6) находят, что

$$a = g (m_1 - m_2) / (m_1 + m_2) . \quad (11)$$

В уравнении (11) массы m_1 и m_2 грузов B и A в процессе движения не меняются, то есть постоянны, ускорение свободного падения $g = \text{const}$, поэтому можно сделать *вывод*, что ускорение a , с которым движется рассматриваемая система грузов, постоянно. Следовательно, движение грузов A и B – равноускоренное.

Проверить справедливость второго закона Ньютона означает получить на опыте зависимость ускорения a движения системы грузов B и A от величины силы F , действующей на эти грузы, (при $m = \text{const}$) и доказать, что полученная зависимость является линейной.

Описание экспериментальной установки

В лабораторной работе используется полуавтоматическая машина Атвуда, схема которой изображена на рис. 2.

На верхнем конце стойки (2) расположен блок (5). Через блок перекинута нить (4) с грузами A и B . Нить удерживается зажимом (6) с электромагнитным выключателем. Перемещение грузов измеряется по шкале (3), а время их движения определяется с помощью электронного счётчика-секундомера ЭСС. Зеркальце (7) предназначено для более удобного

измерения величины перемещения груза **В**. Для срабатывания электромагнита зажима (**6**), удерживающего нить, необходим источник питания ИП постоянного тока (12 В, 2А). Отключение зажима (**6**) производится с помощью кнопки **П**, нажатие которой приводит к подключению источника питания ИП к электромагниту зажима (**6**). Электромагнит, срабатывая, освобождает нить (**4**) с грузами, и они приходят в движение. Одновременно с началом их движения включается счётчик–секундомер ЭСС и начинается отсчёт времени движения грузов. Достигнув приёмного столика (**8**) концевого выключателя (**1**), груз **В** ударяет о столик. В результате удара приёмный столик (**8**) смещается вниз и тем самым происходит автоматическое размыкание электрических цепей секундомера ЭСС и электромагнитного выключателя зажима (**6**), что приводит к зажиму нити (**4**).

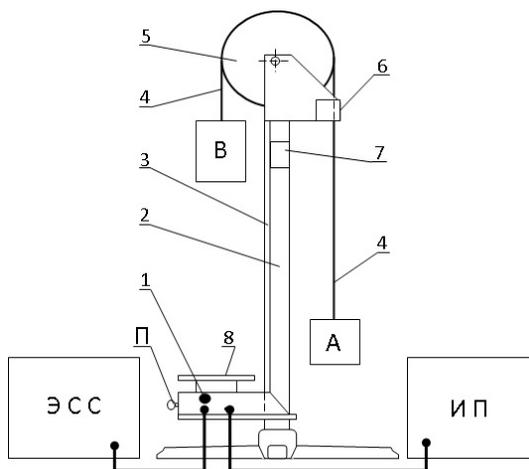


Рис. 2. Схема экспериментальной установки.

1 – концевой выключатель; **2** – верхний конец стойки; **3** – измерительная шкала; **4** – нить с грузами **А** и **В**; **5** – блок; **6** – зажим с электромагнитным выключателем; **7** – зеркальце; **8** – приёмный столик; ЭСС – электронный счётчик-секундомер; **П** – кнопка, обеспечивающая подключение **ИП** – источника питания постоянного тока.

Измерения и обработка результатов

Задание 1. *Используя машину Атвуда, экспериментально определить, что движение грузов **A** и **B** является поступательным равноускоренным.*

Грузы надо установить так, чтобы груз **B** мог пройти до приёмного столика (8) расстояние S_1 , равное 0,5 м. На цифровом табло ЭСС установить нули кнопкой «Сброс». Кнопкой **П** включить установку. Грузы начинают перемещаться, а секундомер – измерять время t_1 их движения до момента удара груза **B** о столик (8). Повторяя опыт, например, пять раз, значения полученного времени заносят в таблицу 1. Определяют среднее значение времени движения груза **B** по формуле

$$t_{\text{ср}} = (t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5) / 5, \quad (12)$$

которое в дальнейшем используется для вычисления ускорения a_1 по формуле (4). Значение a_1 записывают в таблицу 1.

Аналогичные опыты следует выполнить ещё для двух перемещений S_2 и S_3 , которые отличаются от начального S_1 на 7-15 см. Результаты измерений величин времени и вычисленных значений ускорений a_2 и a_3 заносят в таблицу 1.

Таблица 1. Результаты измерений и вычислений ускорения
а.

S, м	t_1 , с	t_2 , с	t_3 , с	t_4 , с	t_5 , с	$t_{\text{ср}}$, с	a , м/с ²

Из анализа полученных результатов следует сделать вывод о виде движения.

Задание 2. *Найти абсолютную и относительную погрешности определения ускорения a .*

Задание 3 (дополнительное). *Экспериментально проверить справедливость второго закона Ньютона при*

поступательном равноускоренном движении системы грузов А и В.

Чтобы получить экспериментальным путём зависимость ускорения a от силы F на машине Атвуда, необходимо систему грузов **А** и **В** укомплектовать грузиками массой Δm каждый. Перекладывая добавочные грузики от груза **А** к грузу **В**, можно получить различные значения результирующей силы F , действующей на систему грузов, масса которой при этом не изменяется ($m = \text{const}$). Для каждого значения силы нужно найти величину ускорения движения системы грузов по формуле (4). Время t , входящее в эту формулу, находят как среднюю величину $t_{\text{ср}}$ из пяти измерений времен движения груза **В** на пути $S = 0,5$ м. По полученным результатам требуется построить график зависимости ускорения a от силы F , то есть $a = f(F)$.

Найденные значения ускорений a_1, a_2, \dots сравните с теоретическим значением ускорений, вычисленных по формуле (11).

Сделайте вывод, подготовьте отчёт.

Контрольные вопросы

1. Виды движения тел.
2. Способы задания движения тел, уравнения движения.
3. Что называется векторами перемещения, скорости, импульса и ускорения тела? Единицы их измерения.
4. Как по закону движения тела определить его скорость и ускорение?
5. Понятие массы тела, единица её измерения.
6. Что представляет собой сила в механике, единица её измерения.
7. Какие системы отсчёта называются инерциальными?
8. Законы Ньютона, границы их применимости.

Литература

1. Грабовский, Р. И. Курс физики : учебное пособие - Санкт – Петербург : Лань, 2009. - 608 с., гл. 1. - С. 19 - 28. - Текст : непосредственный.

2. Детлаф, А. А. Курс физики : учебное пособие для студентов вузов / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский. – Москва : Академия, 2005. – 720 с., гл. 1, 2. - С. 8 - – 32. – Текст : непосредственный.
3. Зисман, Г. А. Курс общей физики : учебное пособие : [в 3-х томах] / Г. А. Зисман, О. М. Тодес. – Санкт-Петербург : Лань, 2011. - Т. 1. Механика. Молекулярная физика. Колебания и волны. – 352 с., гл. 1. – С. 15 – 21. – Текст : непосредственный.
4. Макаренко, Г. М. Физика. - Минск : Дизайн ПРО, 1997. – Т. 1 Механика. Основы молекулярной физики и термодинамики. - 176 с., гл. 1,2. - С. 6 – 14. - Текст : непосредственный.
5. Савельев, И. В. Курс общей физики: учебное пособие для студентов вузов : [в 3-х томах]. – Санкт – Петербург : Лань, 2005. – Т.1. Механика. Молекулярная физика 432 с., гл. 1. – С. 17 - 41. – Текст : непосредственный.
6. Трофимова, Т. И. Физика в таблицах и формулах. – Москва : Дрофа, 2002. – 432 с., гл. 1.1.3. - 1.1.4. – С.5 – 9. - Текст : непосредственный.

Работа 4. ИЗУЧЕНИЕ ВРАЩАТЕЛЬНОГО РАВНОУСКОРЕННОГО ДВИЖЕНИЯ ТЕЛ

Цель работы: экспериментально получить подтверждение справедливости основного закона динамики вращательного движения.

Приборы и принадлежности: лабораторная экспериментальная установка с принадлежностями, счётчик-секундомер электронный школьный (ССЭШ), источник питания постоянного тока (12 В, 2 А), весы с разновесами, штангенциркуль.

Краткие теоретические сведения

При вращении твёрдого тела вокруг неподвижной оси все его точки описывают окружности, центры которых лежат на одной прямой - оси вращения.

Быстрота изменения угловой скорости характеризуется угловым ускорением ε

$$\varepsilon = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \omega}{\Delta t} = \frac{d\omega}{dt}, \quad (2)$$

где $\Delta \omega$ - изменение угловой скорости за время Δt . Угловое ускорение измеряется в рад/с².

Вектор углового ускорения ω как и векторы ϕ и ε направлен вдоль оси вращения. Направления векторов ω и ε совпадают при ускоренном вращении тела (если угловая скорость возрастает) и противоположны – при замедленном вращении тела (если угловая скорость тела убывает).

Причиной изменения угловой скорости тела является действие момента силы \mathbf{M} , величина которого равна произведению модуля силы F на плечо d этой силы (плечо - это кратчайшее расстояние между осью вращения и линией действия силы)

$$\mathbf{M} = F d. \quad (3)$$

Момент силы также является осевым вектором, его направление определяется правилом правого винта (правилом буравчика). Если вместо плеча d воспользоваться радиусом-вектором \mathbf{r} (радиус-вектор точки приложения вектора силы \mathbf{F} относительно оси вращения тела), когда

$$d = r \sin(\mathbf{r} \wedge \mathbf{F}), \quad (4)$$

то вектор момента силы \mathbf{M} можно представить в виде векторного произведения

$$\mathbf{M} = \mathbf{r} \times \mathbf{F}. \quad (5)$$

Угловое ускорение ε вращающегося тела зависит не только от момента \mathbf{M} силы, действующей на тело, массы m тела, но и от того, как распределена эта масса относительно оси вращения. Поэтому в динамике вращательного движения инерционные свойства тела определяются его моментом инерции J относительно оси вращения. Твёрдое тело можно представить как систему материальных точек массами m_i . Скалярная величина

$$J_i = m_i r_i^2, \quad (6)$$

где r_i - расстояние от оси вращения до i -й материальной точки массой m_i , называется моментом инерции i -й точки.

Сумма моментов инерции всех точек тела относительно оси вращения называется моментом инерции J тела относительно этой оси

$$J = \sum m_i r_i^2. \quad (7)$$

Момент инерции J тела зависит от массы тела, его формы и размеров, а также от положения оси вращения. Поэтому каждое твёрдое тело имеет определённое значение момента инерции, зависящее от положения его оси вращения. Эта зависимость определяется теоремой Штейнера, согласно которой

$$J = J_o + m r_c^2, \quad (8)$$

где J_o - момент инерции тела относительно оси, проходящей через центр масс тела, r_c - расстояние от центра масс до оси вращения тела.

По второму закону динамики вращательного движения твёрдого тела можно записать, что

$$\mathbf{M} = d(\mathbf{J}\boldsymbol{\omega}) / dt. \quad (9)$$

Если во время вращения тела $J = \text{const}$, то уравнение (9) принимает вид

$$\mathbf{M} = J d\boldsymbol{\omega} / dt = J \boldsymbol{\varepsilon}, \quad (10)$$

где $\boldsymbol{\varepsilon}$ является угловым ускорением тела. Отсюда

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{M} / J. \quad (11)$$

Уравнение (11) выражает *основной закон динамики вращательного движения твёрдых тел (второй закон Ньютона для вращательного движения): угловое ускорение вращающегося тела прямо пропорционально суммарному моменту внешних сил, приложенных к телу, и обратно пропорционально моменту инерции тела относительно оси вращения.*

Моментом количества движения (моментом импульса) материальной точки при вращении тела вокруг оси называется векторная величина

$$\mathbf{L}_i = \mathbf{r}_i \times (m_i \mathbf{V}_i), \quad (12)$$

где \mathbf{r}_i - радиус-вектор материальной точки массой m_i , $m_i \mathbf{V}_i$ - количество движения (импульс) этой точки, \mathbf{V}_i - линейная скорость её движения.

Для системы материальных точек (для тела) момент импульса равен

$$L = \sum L_i. \quad (13)$$

Или, учитывая связь между линейными и угловыми величинами, характеризующими вращение тела, выражение (13) можно записать в виде

$$\mathbf{L} = \mathbf{J} \boldsymbol{\omega}. \quad (14)$$

Тогда уравнение (10) запишется следующим образом

$$\mathbf{M} = \mathbf{J} d\boldsymbol{\omega} / dt = d(\mathbf{J}\boldsymbol{\omega}) / dt = d\mathbf{L} / dt. \quad (15)$$

Уравнение (15) – наиболее общий вид основного уравнения динамики вращательного движения, согласно которому скорость изменения момента импульса вращающегося тела определяется суммарным моментом сил, действующих на тело.

Описание экспериментальной установки

В работе используется установка, изображённая на рис. 2. Она отличается от машины Атвуда только тем, что вместо блока с электромагнитным зажимом нити устанавливается диск (5) с электромагнитным тормозом (6). Этот диск имеет барабан для наматывания нити (4). Вращение диска осуществляется под действием груза А с перегрузкам, которое определяется моментом силы и зависит как от массы груза с перегрузками, так и от размеров барабана, на который намотана нить.

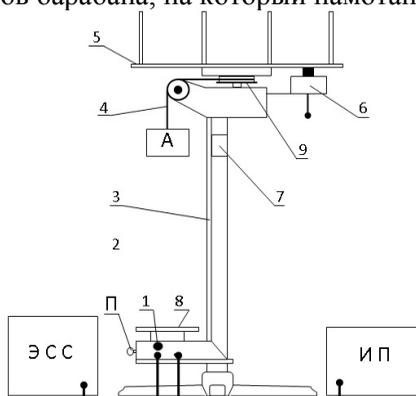


Рис. 2. Схема экспериментальной установки.

1 – концевой выключатель; 2 – верхний конец стойки; 3 – измерительная шкала; 4 – нить с грузом А; 5 – блок; 6 – электромагнитный тормоз; 7 – зеркальце; 8 – приёмный столик; 9 – барабан радиуса r , на который намотана нить; ЭСС –

электронный счётчик-секундомер; **П** - кнопка, обеспечивающая подключение **ИП** - источника питания постоянного тока.

Измерения и обработка результатов

Груз **A**, движущийся с ускорением **a**, действует на диск, заставляя его вращаться, с силой

$$F = m (g - a), \quad (16)$$

где **m** - масса груза **A** с перегрузками.

Зная радиус **r** барабана, на который намотана нить, и силу **F**, находят величину момента этой силы

$$M = m (g - a) r. \quad (17)$$

Изменяя массу груза **A** с помощью дополнительных грузов, можно получить множество значений для момента силы **F**. Радиус барабана измеряют с помощью штангенциркуля. Массы груза **A** и дополнительных грузов определяют на весах.

Рассматриваемое движение является равноускоренным. Измеряя время движения груза **t** и пройденный путь **h**, находят ускорение груза **A** по следующей формуле

$$a = 2h / t^2. \quad (18)$$

Величину углового ускорения можно найти из уравнения для тангенциального ускорения ($a_t = a$)

$$a = \varepsilon r. \quad (19)$$

Откуда

$$\varepsilon = a / r = 2h / (t^2 r). \quad (20)$$

Момент инерции диска (**5**) прибора Атвуда находят по формуле

$$J_0 = M / \varepsilon. \quad (21)$$

Такой метод определения момента инерции тела называется способом падающего груза.

Задание 1. Установить зависимость между величиной углового ускорения ε и действующим моментом силы M .

Построить график зависимости $\varepsilon = f(M)$.

При выполнении этого эксперимента момент инерции тела **J** должен оставаться постоянным. Таким телом является

вращающийся диск самого прибора. Действуя на этот диск (не менее пяти раз) различными моментами сил: изменяя массу груза с помощью дополнительных грузов, определяют для каждого из них угловое ускорение по формуле (20).

Измеренные и вычисленные значения физических величин заносят в таблицу 1.

Таблица 1. Результаты измерений и вычислений.

№ п/п	m, кг	h, м	t _{ср} , с	a, м/с ²	r, м	ε, рад/с ²	M, Н·м	J _о , кг·м ²
1								
2								
3								

На основе полученных результатов эксперимента сформулировать вывод о зависимости углового ускорения тела от действующего на него момента силы и сравнить его с формулировкой основного закона динамики вращательного движения

$$J = M_1 / \varepsilon_1 = M_2 / \varepsilon_2 = M_3 / \varepsilon_3 = \text{const.}$$

Подготовьте отчёт, сделайте вывод.

Контрольные вопросы

1. Момент силы. От чего и как он зависит? Единица измерения.
2. Угловая скорость и угловое ускорение. Какова связь между линейными и угловыми скоростями и ускорениями?
3. Как определить направление векторов угловой скорости, углового ускорения, момента силы?
4. Физический смысл понятия момента инерции тела.
5. Теорема Штейнера.
6. Понятие момента количества движения (момента импульса). Как определить направление вектора момента импульса?
7. Формулировка основного закона динамики вращательного движения.
8. Закон сохранения момента импульса.

Литература

1. Грабовский, Р. И. Курс физики : учебное пособие - Санкт – Петербург : Лань, 2009. - 608 с., гл. 4. - С. 71 - 80. - Текст : непосредственный.
2. Детлаф, А. А. Курс физики : учебное пособие для студентов вузов / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский. – Москва : Академия, 2005. – 720 с., гл. 4. - С. 47 – 59. – Текст : непосредственный.
3. Зисман, Г. А. Курс общей физики : учебное пособие : [в 3-х томах] / Г. А. Зисман, О. М. Тодес. – Санкт-Петербург : Лань, 2011. - Т. 1. Механика. Молекулярная физика. Колебания и волны. – 352 с., гл. 3. – С. 56 – 67. – Текст : непосредственный.
4. Макаренко, Г. М. Физика. - Минск : Дизайн ПРО, 1997. – Т. 1 Механика. Основы молекулярной физики и термодинамики. - 176 с., гл. 4. – С. 38 – 48. - Текст : непосредственный.
5. Савельев, И. В. Курс общей физики: учебное пособие для студентов вузов : [в 3-х томах]. – Санкт – Петербург : Лань, 2005. – Т.1. Механика. Молекулярная физика 432 с., гл. 5. – С. 131 - 161. – Текст : непосредственный.
6. Трофимова, Т. И. Физика в таблицах и формулах. – Москва : Дрофа, 2002. – 432 с., гл. 1.4.1. – 1.4.4. – С.35 - 40. - Текст : непосредственный.

Работа № 5. ИЗУЧЕНИЕ НЕУПРУГОГО УДАРА И ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ПУЛИ С ПОМОЩЬЮ БАЛЛИСТИЧЕСКОГО МАЯТНИКА

Цель работы: знакомство с методом баллистического маятника; проверка законов сохранения импульса и энергии при неупругом ударе.

Приборы и принадлежности: баллистический маятник со шкалой; пружинный пистолет; набор пуль (шариков), весы с разновесками, масштабная линейка.

Краткие теоретические сведения

Непосредственное измерение скорости пули является непростой экспериментальной задачей, т.к. она достигает довольно значительной величины (для боевой винтовки она достигает 800 – 1000 м/с). Поэтому большое распространение получили различные косвенные методы ее определения. Один из таких методов – кинематический: он основан на использовании законов кинематики поступательного и вращательного движения. В основе другого: динамического – лежит применение законов сохранения количества движения и энергии.

Динамический метод определения скорости движения тел является одним из наиболее простых. Он основан на использовании законов сохранения механической энергии и количества движения (импульса). Эти законы справедливы для замкнутых систем, в которых действуют консервативные силы. Физический смысл рассматриваемых законов заключается в том, что полная механическая энергия и количество движения пули (шарика) в такой системе остаются постоянными.

Кинематический метод.

Установка, с помощью которой определяется скорость пули (1), состоит из двух бумажных дисков (2) и (3), закрепленных на общей оси (4), на некотором расстоянии d друг от друга. Ось приводится во вращение, пуля в полёте пробивает оба диска. За время полета пули между дисками они успевают повернуться на некоторый угол (рис. 1) α .

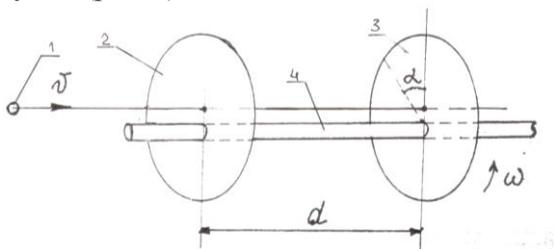


Рис. 1. Схема кинематического метода.

1 – пуля; v – скорость пули; 2, 3 – диски; 4 – ось; ω – угловая скорость вращения дисков; d – расстояние между дисками; α – угол поворота диска.

При равномерном движении пули время t , за которое она пройдет расстояние d , определяется уравнением

$$t = \frac{d}{v}. \quad (1)$$

За это же время диски поворачиваются на угол

$$\alpha = \omega \times t, \quad (2)$$

где ω – угловая скорость вращения дисков.

Приравняв время t в уравнениях (1) и (2), получают

$$\frac{d}{\omega} = \frac{d}{v}. \quad (3)$$

Откуда

$$v = \frac{d \times \omega}{\alpha}. \quad (4)$$

Здесь угол поворота α необходимо выражать в радианах, а угловую скорость ω в рад/с.

Динамический метод.

Этот метод основан на том, что пуля испытывает абсолютно неупругий удар о неподвижное тело значительной массы, вследствие чего маятник начинает двигаться.

Пусть горизонтально летящая пуля испытывает абсолютно неупругий удар с неподвижным, подвешенным на четырех нитях телом, определенной массы – баллистическим маятником. В ходе удара пули в маятник, и маятник и пуля начинают двигаться в соответствии с законами сохранения количества движения и полной механической энергии.

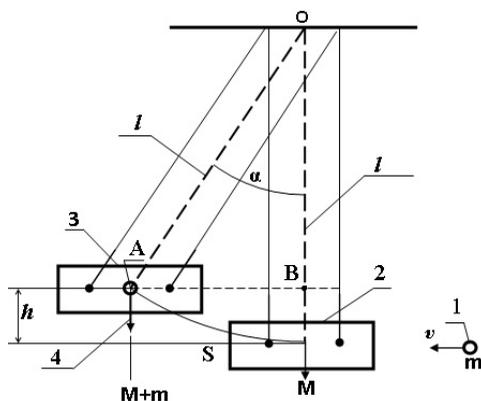


Рис. 2. Баллистический маятник.

1 – пуля (шарик); **2** – корпус маятника; **3** – корпус с пулей; **4** – указатель горизонтального смещения маятника; l – четыре нити маятника; m – масса пули; M – масса маятника; S_x – горизонтальное смещение маятника с пулей.

Баллистический маятник (рис. 2) – это открытый с одной стороны корпус (**2**), например, цилиндр, содержащий внутри пластилин, песок или бумагу.... Его подвешивают на четырех длинных нитях l (бифилярный подвес). Маятник снабжен указателем (**4**) для отсчета горизонтального смещения S после попадания в него пули (**1**). Выстрел производится в переднюю (открытую) стенку неподвижного маятника. При попадании пули массой m в неподвижный маятник с массой M , она застревает в нем и они, двигаясь вместе, отклоняются на угол α , приобретая в момент удара скорость \vec{U} . По закону сохранения импульса суммарный импульс изолированной системы не изменяется, т.е.

$$m\vec{v} = (m + M)\vec{U}, \quad (5)$$

где \vec{v} – скорость пули до удара; \vec{U} – скорость, приобретаемая маятником после попадания в него пули.

После выстрела и попадания пули в маятник, система приходит в движение со скоростью \vec{U} и приобретает

кинетическую энергию, которая затем переходит в потенциальную энергию, так как при отклонении маятника от положения равновесия его центр масс поднимается на высоту h (рис. 2). По закону сохранения энергии для подобной системы выполняется равенство

$$\frac{(m+M)U^2}{2} = (m+M)gh. \quad (6)$$

Решая совместно уравнения (5) и (6), получают для скорости v пули перед ударом соотношение

$$v = \frac{(m+M)}{m} \times \sqrt{2gh}. \quad (7)$$

Учитывая, что масса пули во много раз меньше массы маятника ($m \ll M$), формулу (7) упрощают

$$v \approx \frac{M}{m} \times \sqrt{2gh}. \quad (8)$$

Из уравнения (8) следует, что для нахождения скорости пули v необходимо знать величину h . Однако непосредственное измерение величины h затруднительно из-за ее малости поэтому пользуются косвенным способом её определения.

Для этой цели предлагается рассмотреть треугольник AOB на рис. 1 и, используя теорему Пифагора, записать $AB^2 = AO^2 - OB^2$ или

$$S^2 = \ell^2 - (\ell - h)^2. \quad (9)$$

Откуда

$$S^2 = 2\ell h - h^2. \quad (10)$$

В условиях проводимого опыта $h \ll \ell$, поэтому величиной h^2 можно пренебречь и тогда из формулы (10) следует, что h приблизительно равна

$$h \approx \frac{S^2}{2\ell}. \quad (11)$$

Подставив это значение h в формулу (8) , получают для скорости пули v выражение

$$v \approx \frac{M}{m} \times S \times \sqrt{\frac{g}{\ell}} . \quad (12)$$

Из уравнения (8) следует, что скорость пули v можно определить по величине отклонения S маятника от положения равновесия после попадания в него пули (удар неупругий). Все остальные величины, входящие в формулу (8) M , m , ℓ находят измеряя их величины.

Описание установки

Используемая в работе установка состоит из закрепленного на штативе (5) баллистического маятника (2), представляющего собой цилиндр, подвешенный на длинных нитях (4) равной длины (рис. 3). Цилиндр снабжен указателем (3), который перемещается вместе с цилиндром вдоль шкалы (1), что позволяет измерять

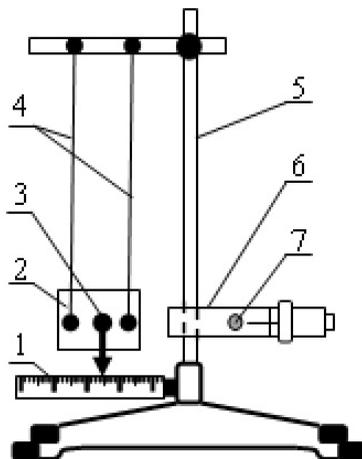


Рис. 3. Установка для определения скорости пули.

1 – шкала; 2 - баллистический маятник; 3 - указатель смещения маятника; 4 - нити подвеса маятника; 5 - штатив; 6 – пружинный пистолет; 7 – пуля (шарик).

горизонтальное смещение S маятника от его первоначального положения. Используемую пулю (7) (шарик) помещают в пружинный пистолет (6). После нажатия стопора пистолета пуля вылетает из него и попадает в маятник, благодаря чему происходит смещение маятника на величину S .

Массу пули и массу маятника находят с помощью весов с разновесами, а длины нитей ℓ измеряют линейкой.

Таким образом, экспериментальным путем получают все величины S , M и m , необходимые для расчетов скорости v пули по формуле (12).

Измерения и обработка результатов.

Задание 1. Изучить устройство установки (рис.2), работу пружинного пистолета и правила обращения с ним.

Убедитесь в том, что штатив (5) маятника занимает вертикальное положение, а длины всех четырёх нитей подвеса маятника одинаковы и равны ℓ . Значения длин ℓ занесите в таблицу 1. Найдите по шкале (1) показание n_0 указателя (3) маятника (2) и запишите его значение в таблицу 1.

Определите массы маятника (2) и пуль (шариков) (7), предназначенных для выстрелов (3 – 4 шарика). Для этого используйте весы с разновесами. Результаты занесите в таблицу 1.

Задание 2. Произвести по три выстрела каждым шариком, отмечая каждый раз показание n_1 указателя (3) маятника и занося его значение в таблицу 1.

Рассчитайте величину смещения указателя $S = n_1 - n_0$ для каждого выстрела и для каждого шарика. Результаты занесите в таблицу 1.

Задание 3. Рассчитать по формуле (12) величину скоростей каждой пули (шариков). Результаты расчетов занесите в таблицу 1.

Найдите среднее значение скорости \bar{v} для каждой пули (шарика).

Определите абсолютную и относительную погрешности нахождения скорости пули (шарика).

Таблица 1. Результаты измерений и вычислений.

пуля № изм.	ℓ , м	m, кг	M, кг	n_0	n	S, м	v , м/с	\bar{v} , м/с
1/1								
1/2								
1/3								
2/1								
2/2								
2/3								
3/1								
3/2								
3/3								
4/1								
4/2								
4/3								

Сделайте вывод, подготовьте отчет.

Контрольные вопросы

1. Что называется импульсом тела, системы тел?
2. Как формулируется и записывается математически закон сохранения импульса для изолированной системы?
3. В чем сущность закона сохранения энергии для механической системы? Как он записывается математически?
4. Как различаются абсолютно упругий, и неупругий удары тел?
5. Почему в данной работе рекомендуется стрелять по неподвижному маятнику?
6. Какие превращения энергии происходят при попадании пули в маятник?

Литература

1. Грабовский, Р. И. Курс физики : учебное пособие - Санкт – Петербург : Лань, 2009. - 608 с., гл. 3. - С. 51 - 69. - Текст : непосредственный.
2. Детлаф, А. А. Курс физики : учебное пособие для студентов вузов / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский. – Москва : Академия, 2005. – 720 с., гл. 5. - С. 59 – 74. – Текст : непосредственный.
3. Зисман, Г. А. Курс общей физики : учебное пособие : [в 3-х томах] / Г. А. Зисман, О. М. Тодес. – Санкт-Петербург : Лань, 2011. - Т. 1. Механика. Молекулярная физика. Колебания и волны. – 352 с., гл. 2. – С. 35 – 56. – Текст : непосредственный.
4. Макаренко, Г. М. Физика. - Минск : Дизайн ПРО, 1997. – Т. 1 Механика. Основы молекулярной физики и термодинамики. - 176 с., гл. 11. - Текст : непосредственный.
5. Савельев, И. В. Курс общей физики: учебное пособие для студентов вузов : [в 3-х томах]. – Санкт – Петербург : Лань, 2005. – Т.1. Механика. Молекулярная физика 432 с., гл. 3. – С. 74 - 118. – Текст : непосредственный.
6. Трофимова, Т. И. Физика в таблицах и формулах. – Москва : Дрофа, 2002. – 432 с., гл. 1.3.1. – 1.3.5. – С. 23 - 25. - Текст : непосредственный.

Работа № 6. ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВЯЗКОСТИ ЖИДКОСТИ МЕТОДОМ СТОКСА

Цель работы: ознакомиться с теорией метода Стокса, изучить устройство установки и определить вязкость исследуемой жидкости (глицерин, касторовое масло и пр.).

Приборы и принадлежности: прибор для определения вязкости жидкости по методу Стокса, секундомер, исследуемая жидкость, пинцет, набор шариков, окулярный микрометр.

Краткие теоретические сведения

С молекулярной точки зрения жидкость занимает промежуточное положение между твердыми

(кристаллическими) телами и газами. Главными отличительными свойствами жидкости являются: наличие у неё поверхности раздела и текучесть.

Для кристаллических тел энергия связи между атомами во много раз больше энергии их теплового движения ($W_{\text{связи}} \gg kT$), а для газообразных - меньше её ($W_{\text{связи}} < kT$). Для жидкого состояния энергия связи между молекулами чуть больше kT .

Характер движения молекул жидкости имеет общие черты с движением молекул твердого тела и газа. В жидкостях, как и в кристаллах, каждая молекула совершает колебательные движения, находясь в «потенциальной яме» электрического поля, создаваемого окружающими молекулами. Глубина этой «ямы» немного больше средней кинетической энергии колеблющихся частиц. Поэтому колебания частиц происходят около более или менее стабильных положений их равновесия. Но эта стабильность неустойчивая и по истечении короткого промежутка времени $\tau \approx 10^{-8}$ с молекула преодолевают потенциальный барьер и переходят, совершая скачек, в новое «оседлое» положение - в другую «потенциальную яму».. Там она вновь совершает колебательные движения до следующего скачка...

Среднее время «оседлой» жизни молекулы жидкости зависит от ее температуры. С повышением температуры время τ оседлой жизни молекул быстро уменьшается, что обуславливает большую подвижность молекул, её текучесть и уменьшение её вязкости при высоких температурах

$$\tau = \tau_0 e^{\frac{W_a}{kT}}, \quad (1)$$

где k – постоянная Больцмана; τ_0 - средний период колебаний частиц жидкости около положения равновесия; W_a – энергия активации, которая характеризует минимальную энергию, необходимую для преодоления потенциального барьера при переходе молекул в новое оседлое положение.

У газов с повышением температуры вязкость увеличивается. Это указывает на различие механизма внутреннего трения в этих средах.

Если продолжительность действия внешней силы $t \gg \tau$, то частицы жидкости смешиваются преимущественно в направлении действия этой силы и жидкость обнаруживает свойство текучести. Если же $t \ll \tau$, то за время действия внешней силы частицы не успевают изменить свое положение равновесия, и жидкость ведет себя как упругая среда. Существуют ламинарное и турбулентное течения жидкости.

Ламинарным (слоистым) называется такое течение, при котором частицы жидкости движутся, не перемешиваясь, вдоль прямолинейных траекторий. При ламинарном течении жидкость может быть представлена в виде слоев, которые скользят относительно друг друга. Такое течение стационарно.

При движении слоев жидкости с различными скоростями между ними возникают силы соприкосновения, называемые силами внутреннего трения $F_{тр}$ или силами вязкости (рис. 1). Величина такой силы может быть определена законом Ньютона (2) следующего вида

$$F_{тр} = -\eta \frac{dv_z}{dz} \times \Delta S, \quad (2)$$

где η - коэффициент вязкости, зависящий от природы жидкости

и температуры; $\frac{dv_z}{dz}$ - градиент скорости, который показывает

как быстро изменяется величина скорости v в направлении оси Z к поверхности слоя; ΔS - площадь поверхности соприкасающихся движущихся слоев.

Из уравнения (2) определяют коэффициент вязкости

$$\eta = \frac{F_{тр}}{\left| \frac{dv_z}{dz} \right| \times \Delta S}. \quad (3)$$

Из равенства (3), находят единицу измерения вязкости жидкости $\eta = 1H \times c / m^2 = 1Па \times c$.

Используя модель скачков молекул жидкости, Я.И.Френкель показал, что ее вязкость η изменяется по экспоненциальному закону

$$\eta = Ae^{\frac{W_a}{kT}}, \quad (4)$$

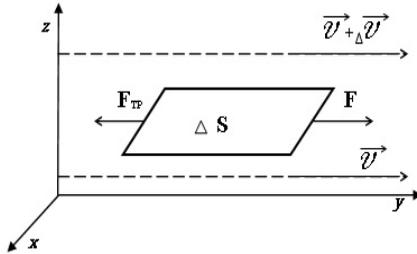


Рис.1. Силы внутреннего трения в жидкости.

где A – коэффициент пропорциональности, определяемый свойствами жидкости и слабо зависящий от температуры,; W_a – энергия активации, связанная с временем релаксации τ (см. уравнение (1)).

Таким образом, коэффициент вязкости жидкости с понижением температуры резко увеличивается (рис. 2).

В ряде случаев вязкость становится настолько большой, что жидкость затвердевает без образования кристаллической решетки. В этом заключается механизм образования аморфных тел. Формула (3) является приближенной, но она достаточно хорошо описывает зависимость вязкости жидкости от ее температуры. Надо отметить, что до настоящего времени строгой теории вязкости жидкости не создано и на практике пользуются различными приближенными формулами.

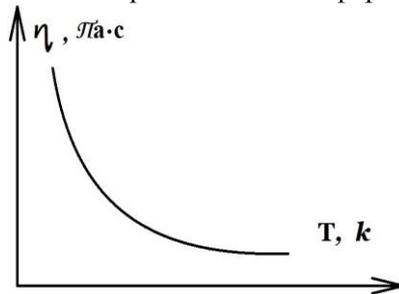


Рис.2. Зависимость вязкости жидкости от температуры.

В газах внутреннее трение объясняется переносом импульса направленного движения молекул из слоя в слой за счет хаотического теплового движения молекул. Как показывает опыт, скорость направленного движения молекул газа мала. Причина состоит в том, что молекулы газа, находясь в состоянии непрерывного хаотического движения, сталкиваются друг с другом. Эти столкновения препятствуют свободному движению молекул, то есть после каждого соударения их скорости существенно меняются и по величине и по направлению. Так что путь отдельной молекулы представляет собой сложную не ровную линию и молекула за одну секунду уходит лишь на небольшое расстояние от того места, где она находилась в начальный момент времени.

Если молекула переходит благодаря хаотическому движению из более быстрого движущегося слоя в более медленный, она отдает избыток своего импульса молекулам медленно движущегося слоя, тем самым ускоряет более медленный слой. Молекулы, попадающие из медленного слоя в более быстрый, увеличивают свой импульс и тормозят более быстрый слой.

Вязкость жидкости определяется подвижностью молекул, движение которых ограничено силами межмолекулярного взаимодействия.

Характер течения жидкости определяется безразмерной величиной Re , называемой числом Рейнольдса (1883г.)

$$Re = \frac{\rho v_0 \ell}{\eta}, \quad (5)$$

где ρ - плотность жидкости; v_0 - средняя (характерная) скорость потока; ℓ - показывает размер обтекаемого тела или трубы, по которой течет жидкость. В случае движения, например, шарика радиусом R со скоростью v в жидкости с плотностью $\rho_{ж}$ число Рейнольдса определяется

$$Re = \rho_{ж} \frac{2Rv}{\eta}. \quad (6)$$

При больших числах Рейнольдса $Re > 1000$ слои жидкости перемешиваются, движение жидкости становится

турбулентным. При малых числах Рейнольдса величиной $Re < 1000$ движение жидкости является ламинарным. И на шарик, движущийся в ламинарной жидкости, действует сила сопротивления $F_{тр}$, равная

$$F_{тр} = C_k \times v, \quad (7)$$

где C_k – величина, зависящая от вязкости жидкости, от размеров и формы тела, движущегося в ней.

Стоксом было получено строгое решение задачи о ламинарном обтекании шарика безграничной жидкостью при малых значениях числа Рейнольдса. Было найдено, что

$$C_k = 6\pi R\eta. \quad (8)$$

Соотношение для силы сопротивления (сила Стокса) $F_{тр}$ в этом случае имеет вид

$$F_{тр} = 6\pi R\eta v \quad (9)$$

и называется законом Стокса.

На шарик, свободно падающий в жидкости, действуют три силы: сила тяжести F_T , выталкивающая сила (сила Архимеда) F_A и сила вязкого сопротивления $F_{тр}$ (рис. 3)

$$\begin{aligned} F_T &= m_{ш} \times g = \frac{4}{3} \pi R^3 \rho_{ш} g; \\ F_A &= m_{ж} \times g = \frac{4}{3} \pi R^3 \rho_{ж} g; \end{aligned} \quad (10)$$

$$F_{тр} = 6\pi\eta Rv,$$

где $m_{ш}$ и $m_{ж}$ - массы шарика и жидкости; $\rho_{ш}$ и $\rho_{ж}$ - плотности шарика и жидкости; R – радиус шарика; v - скорость падения шарика в жидкости; $g = 9,81 \frac{M}{c^2}$ – ускорение свободного падения; η - коэффициент вязкости жидкости.

Равнодействующая этих сил в скалярной форме равна

$$\rho_{ш} gV - \rho_{ж} gV - 6\pi\eta Rv = \rho_{ш} V \frac{dv}{dt}, \quad (11)$$

где $V = \frac{4}{3}\pi R^3$ – объем шарика; t - время падения шарика в жидкости.

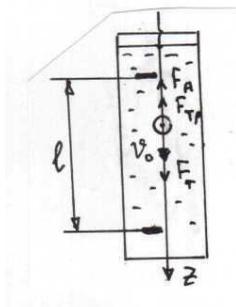


Рис. 3. Движение шарика в вязкой среде.

В начале падения шарик движется с ускорением. Величина этого ускорения с нарастанием скорости падения шарика уменьшается и приближается к нулю. В этот момент скорость шарика становится постоянной и равной v_0 – говорят, что движение установилось (рис.4). А время t_0 , в течение которого шарик приобретает постоянную скорость падения $v_0 = \text{const}$, называется временем релаксации.

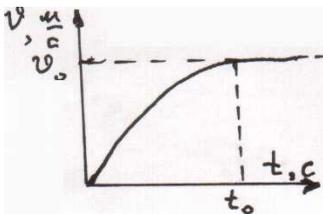


Рис. 4. График установления постоянной скорости падения шарика.

Таким образом, в момент времени $t = t_0$ силы, действующие на тело (шарик), уравниваются друг другом и уравнение движения шарика в жидкости (11) принимает вид

$$(\rho_{ш} - \rho_{ж})gV - 6\pi R\eta v_0 = 0. \quad (12)$$

Скорость установившегося движения v_0 можно найти, измеряя путь ℓ , пройденный шариком при равномерном движении и время t его движения (рис.3)

$$v_0 = \frac{\ell}{t}. \quad (13)$$

Решая совместно уравнения (12-13), получают выражение для определения коэффициента вязкости жидкости

$$\eta = \frac{2}{9} \frac{\rho_{ш} - \rho_{жс}}{v_0} g R^2. \quad (14)$$

И поскольку радиус шарика равен половине его диаметра d , т.е.

$$R = \frac{d}{2}, \text{ а скорость } v_0 = \frac{\ell}{t}, \text{ то}$$

$$\eta = \frac{1}{18} \times \frac{\rho_{ш} - \rho_{жс}}{\ell} \times d^2 g t. \quad (15)$$

Используя формулы (14) и (15) можно экспериментально определить величину вязкости η жидкости, зная плотность вещества шарика и жидкости, и определяя диаметр шарика, время его стационарного падения и длину пути в жидкости, используя простую установку.

Описание установки

Установка для определения вязкости жидкости по методу Стокса (рис.5) состоит из закрепленного на штативе (3) прозрачного цилиндра (1), наполненного исследуемой жидкостью (8). На поверхности цилиндра нанесены две горизонтальные метки (4) и (5), расположенные на расстоянии ℓ друг от друга, фиксируемые по шкале (7). Верхняя метка (4) должна быть ниже уровня жидкости в сосуде (1), настолько, чтобы при падении в жидкости до этой метки шарик (2) успел приобрести скорость установившегося движения (ниже верхнего уровня жидкости примерно на 10 -12 см, то есть в том месте, где движение шарика становится равномерным). Для измерения коэффициента внутреннего трения используются металлические шарики малого диаметра. Диаметры шариков

измеряют с помощью микроскопа с окулярным микрометром. Кран (6) предназначен для извлечения шариков.

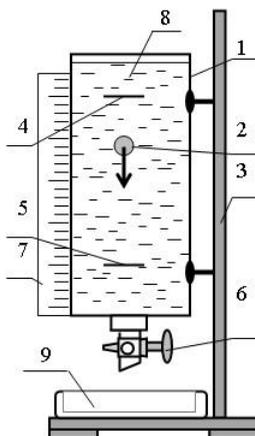


Рис. 5 Установка для определения вязкости жидкости.

1 – цилиндр; 2 – шарик; 3 – штатив; 4 и 5 метки; 6 - кран; 7 – шкала; 8 – исследуемая жидкость 9 – сосуд для сбора исследуемой жидкости и шариков.

Диаметр каждого шарика измеряют в трех - четырех направлениях и находят среднее значение его диаметра. После измерений диаметра d - шарик опускают пинцетом в цилиндр (1) как можно ближе к его центру и наблюдают за движением шарика в жидкости. Глаз наблюдателя должен находиться сначала против верхней метки (4), а затем против нижней метки (5), так чтобы каждая метка сливалась в одну линию. В момент, когда шарик достигает метки (4) включают секундомер, а в момент прохождения шариком нижней метки (5) - выключают. Для повышения точности определения вязкости жидкости, измерения производят не менее чем для трех – четырех шариков.

Плотность исследуемой жидкости определяют с помощью ареометра или берут из справочных данных (Приложение 5).

Измерения и обработка результатов

Задание 1. Подготовить установку к работе: проверить уровень жидкости в цилиндре (1). Он должен быть примерно на 10 см выше метки (4). Измерить расстояние l между метками (4) и (5) по шкале (7).

Задание 2. С помощью окулярного микроскопа измерить диаметры трех-четырех шариков для проведения опытов.

Диаметры шариков находите, пользуясь формулой

$$d = a n, \quad (16)$$

где a – цена деления окулярного микроскопа; n – число делений шкалы между правым и левым краями диаметра шарика.

1. Установите вертикально измерительный микроскоп на лист бумаги в сторону источника света.

2. В центре нижнего отверстия микроскопа поместите шарик.

3. Вращая окуляр и объектив, добейтесь резкого изображения шарика на шкале микроскопа.

4. Определите диаметр шарика, пользуясь формулой (16), и запишите его значение в таблицу 1.

Таким образом, определите диаметры шариков.

Задание 3. Определите вязкость исследуемой жидкости по формулам (14) или (15), пользуясь установкой (рис.5). Из справочных данных (Приложение 3,5) найти значения $\rho_{ш}$ и $\rho_{ж}$ - плотностей шариков и исследуемой жидкости.

Результаты измерений и расчетов свести в таблицу 1.

Пинцетом каждый измеренный шарик опустите в жидкость вдоль оси сосуда (1) в установке. Измерьте время t падения их на пути с момента наступления равномерного его движения, т.е. от метки (4) до метки (5).

Проведите расчеты η для всех шариков и найдите среднее значение вязкости $\eta_{ср}$.

Найдите погрешности определения вязкости.

Таблица 1. Результаты измерений вязкости исследуемой жидкости.

$$\rho_{ж}, \text{ кг/м}^3 \text{ _____ } \rho_{ш}, \text{ кг/м}^3 \text{ _____}$$

№ n/ n	d , м	ℓ , м	t , с	T ₀ , С	η, Па×с	η _{ср.} , Па×с	Δη, Па×с	η _{табл.} , Па×с
1								
2								
3								
4								

Сделайте вывод, подготовьте отчет.

Контрольные вопросы

1. Какое свойство жидкости или газа называется вязкостью?
2. Какое свойство жидкости или газа называется текучестью?
3. Каковы механизмы внутреннего трения в газах и жидкостях?
4. Как изменяется коэффициент вязкости в газах и жидкостях с ростом температуры?
5. Каковы ламинарный и турбулентный режимы течения жидкостей?
6. Перечислите основные свойства жидкостей.
7. Внутреннее строение жидкостей.

Литература

1. Детлаф, А. А. Курс физики : учебное пособие для студентов вузов / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский. – Москва : Академия, 2005. – 720 с., гл. 10. – С. 138 – 142. – Текст : непосредственный.
2. Зисман, Г. А. Курс общей физики : учебное пособие : [в 3-х томах] / Г. А. Зисман, О. М. Годес. – Санкт-Петербург : Лань, 2011. - Т. 1. Механика. Молекулярная физика. Колебания и волны. – 352 с., гл. 11. – С. 230 – 234. – Текст : непосредственный.

3. Макаренко, Г. М. Физика. - Минск : Дизайн ПРО, 1997. – Т. 1 Механика. Основы молекулярной физики и термодинамики. - 176 с., гл. 11. - Текст : непосредственный.
4. Савельев, И. В. Курс общей физики: учебное пособие для студентов вузов : [в 3-х томах]. – Санкт – Петербург : Лань, 2005. – Т.1. Механика. Молекулярная физика 432 с., гл. 16. – С. 414 - 416. – Текст : непосредственный.

Работа № 7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСТОЯННОЙ БОЛЬЦМАНА

Цель работы: изучить устройство и принцип работы установки для определения постоянной Больцмана; определить численное значение постоянной Больцмана.

Оборудование: приборы для определения постоянной Больцмана путем измерения парциального давления газа. Сосуд с легко испаряющейся жидкостью, термометр, микродозатор.

Краткие теоретические сведения

Величина k названа постоянной Больцмана в честь австрийского ученого Л. Больцмана. Она является одной из основных фундаментальных физических констант. Ее значение было определено многими методами с высокой степенью точности и составляет

$$k = 1,380622 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К.} \quad (1)$$

На практике чаще всего пользуются приближенным значением

$$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К.} \quad (2)$$

Исторически сложилось так, что единица измерения температуры К (кельвин) появилась в науке до того, как были разработаны молекулярно-кинетические представления, разъясняющие ее истинный смысл. Согласно этим представлениям температуру тел следовало бы измерять в единицах энергии (в джоулях). Так как эти единицы (кельвин и джоуль) отличаются друг от друга по своему значению, то между ними должно существовать определенное соотношение,

связывающее их. Множитель, выражающий это соотношение, носит название постоянной Больцмана (она введена в науку в 1899 году М.Планком).

Следует помнить, что температура - это макроскопическая характеристика тела, в то время как кинетическая энергия молекулы характеризует отдельную частицу. Поэтому температура должна быть связана со средней кинетической энергией, приходящейся на одну частицу в системе большого числа частиц и постоянную Больцмана k можно определить как величину, на которую изменяется кинетическая энергия одной молекулы идеального газа при изменении его температуры на $2/3$ К.

Описание метода измерений и установки

В данной лабораторной работе для определения постоянной Больцмана, используется метод, основанный на учете основного уравнения молекулярно - кинетической теории идеального газа и закона Дальтона. Эксперимент выполняется на установке (рис. 1), которая состоит из герметически закрываемого сосуда (1), жидкостного манометра (4) и микродозатора (2) с пипеткой (3).

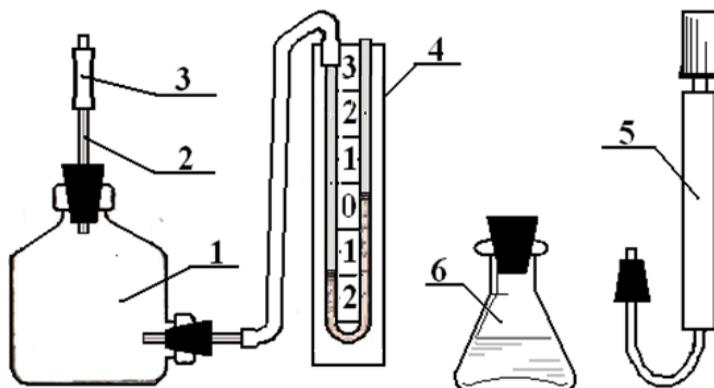


Рис.1. Установка для определения постоянной Больцмана.
1 - сосуд; 2 - микродозатор; 3 - пипетка; 4 – манометр; 5 – насос; 6 - сосуд со спиртом.

В сосуде (1) создают смесь атмосферного воздуха и паров этилового спирта (либо другая легко испаряющаяся жидкость). Для получения этой смеси необходимо с помощью микродозатора ввести в сосуд определенный объем спирта. В результате полного испарения этого спирта давление в сосуде (1) возрастает на величину p_c , которая по закону Дальтона является парциальным давлением паров спирта.

Воспользовавшись уравнением молекулярно-кинетической теории газов можно записать

$$p_c = n_c k T, \quad (3)$$

где n_c - концентрация молекул этилового спирта в смеси; T - температура смеси; k - постоянная Больцмана.

Из соотношения (3) следует, что

$$k = \frac{p_c}{n_c T}. \quad (4)$$

Для того чтобы определить n_c , необходимо знать массу m_c , вводимого в сосуд (1) спирта, массу m_o одной его молекулы, а также объем V сосуда (1). Массу m_c находят по значению объема спирта V_c , вводимого в сосуд, и его плотности ρ

$$m_c = V_c \rho. \quad (5)$$

Объем V_c спирта измеряют микродозатором (2) с пипеткой (3), а его плотность ρ определяют по графику зависимости $\rho(T)$ (см. приложение 18) с учетом температуры T .

Для нахождения m_o используют значение мольной массы μ применяемого в работе этилового спирта и число Авогадро N_A

$$m_o = \frac{\mu}{N_A}. \quad (6)$$

Величину μ мольной массы этилового спирта можно найти, зная его химическую формулу C_2H_5OH .

Концентрация n_c молекул этилового спирта в сосуде (1) после его испарения определяют, используя соотношение

$$n_c = \frac{N_c}{V}, \quad (7)$$

где N_c - число молекул спирта в сосуде (1); V - объем сосуда (1). Число молекул спирта можно определить, зная массу данного спирта m_c и массу одной его молекулы m_o .

Поскольку $N_c = \frac{m_c}{m_o}$ и, принимая во внимание уравнения (5) и (6), получают

$$n_c = \frac{V_c \rho N_A}{\mu V}. \quad (8)$$

Подставляя значение n_c , даваемое соотношением (8), в уравнение (4) можно найти постоянную Больцмана

$$k = \frac{p_c \mu V}{N_A V_c \rho T}, \quad (9)$$

определяя все входящие в уравнение (9) величины.

Измерения и обработка результатов

До выполнения эксперимента необходимо проверить наличие воды в манометре, убедиться в герметичности соединений деталей установки и исправности микродозатора. Необходимо также знать объем сосуда (1), величину радиуса R капилляра микродозатора. Еще нужно определить температуру T , молярную массу μ и плотность ρ спирта, пользуясь приложением 17.

Задание 1. Изучить установку (рис. 1), устройство и действие микродозатора (рис. 2). Измерить величину объема спирта V_c , находящегося в микродозаторе.

Выполнить эксперимент для определения постоянной Больцмана.

Микродозатор (рис. 2) предназначен для измерения малых объемов жидкостей. Прибор состоит из двух частей капилляра и микропипетки. Наполнение капилляра определенным объемом жидкости (этиловый спирт) производите опуская капилляр в сосуд с жидкостью с нажатой микропипеткой. Медленно

ослабляя нажатие пипетки набирайте в капилляр необходимое количество жидкости. После этого капилляр вынимаете из сосуда и опускают пипетку. Определив в капилляре длину уровня, заполненного жидкостью, зная радиус капилляра, вычисляете объем V_c жидкости в микродозаторе.

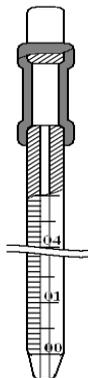


Рис 3. Микродозатор.

Для проведения эксперимента по определению постоянной Больцмана:

- наполните микродозатор спиртом на 20-25 делений капилляра;
- из микродозатора спирт введите в сосуд (1) (рис.1) через резиновый уплотнитель;
- измерьте манометром (4) наибольшее парциальное давление P_c паров спирта в сосуде (1), т.е. через 8-10 минут от начала его испарения.

Задание 2. Провести расчеты постоянной Больцмана, пользуясь уравнением (9) и результатами экспериментов.

Плотность спирта, находящегося в микродозаторе, (1) определите с помощью графика (рис. 3).

График зависимости ρ_c от T (рис. 2) позволяет определить плотность этилового спирта при температуре проводимого эксперимента. Для этого нужно измерив температуру спирта в кельвинах, зафиксировать точку ее значения на оси температур на графике. От этой точки подняться вертикально до кривой

зависимости ρ_c от T и отсчитать значение плотности спирта ρ_c по оси абсцисс.

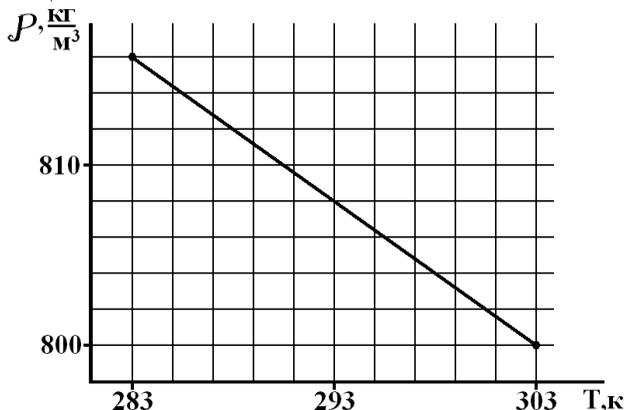


Рис.3. Зависимость плотности спирта ρ_c от температуры.

Задание 3. Повторить опыт не менее трех раз.

Перед повторным опытом необходимо удалять пары спирта из сосуда (1). Для этого нужно снять с сосуда резиновые уплотнители для микродозатора (2) и манометра (4). Используя насос (5), прокачать воздух в сосуде в течение 2-3 минут. Результаты измерений и вычислений заносите в таблицу 1.

Таблица 1. Результаты определения величины постоянной Больцмана

Величина	1 опыт	2 опыт	3 опыт
Мольная масса спирта, кг/ моль			
Плотность спирта, кг/м ³			
Температура смеси, К			
Объем спирта, м ³			
Парциальное давление спирта, Па			
Постоянная Больцмана k , Дж/К			
Среднее значение k , Дж/К			
Погрешность измерений k			

Найти погрешности определения k .
Сделайте вывод, подготовьте отчет.

Контрольные вопросы

1. Физический смысл понятия «температура».
2. Связь между температурой тела и средней кинетической энергией одной молекулы этого тела.
3. Необходимость введения постоянной Больцмана в науку.
4. Основное уравнение молекулярно-кинетической теории газов.
5. Законы Дальтона и Авогадро.
6. Что такое парциальное давление паров газа?
7. Измерения каких параметров (см. формулу (9)) влияют на точность определения постоянной Больцмана?
8. Почему перед повторными опытами необходимо удалять пары спирта из сосуда (1)?

Литература

1. Грабовский, Р. И. Курс физики : учебное пособие - Санкт – Петербург : Лань, 2009. - 608 с., гл. 7. - С. 115 -123. - Текст : непосредственный.
2. Детлаф, А. А. Курс физики : учебное пособие для студентов вузов / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский. – Москва : Академия, 2005. – 720 с., гл. 8. - С. 105 – 113. – Текст : непосредственный.
3. Зисман, Г. А. Курс общей физики : учебное пособие : [в 3-х томах] / Г. А. Зисман, О. М. Тодес. – Санкт-Петербург : Лань, 2011. - Т. 1. Механика. Молекулярная физика. Колебания и волны. – 352 с., гл. 5. – С. 73 – 93. – Текст : непосредственный.
4. Макаренко, Г. М. Физика. - Минск : Дизайн ПРО, 1997. – Т. 1 Механика. Основы молекулярной физики и термодинамики. - 176 с., гл. 12. - Текст : непосредственный.
5. Савельев, И. В. Курс общей физики: учебное пособие для студентов вузов : [в 3-х томах]. – Санкт – Петербург : Лань, 2005. – Т.1. Механика. Молекулярная физика 432 с., гл. 10. – С. 262 - 291. – Текст : непосредственный.

6. Трофимова, Т. И. Физика в таблицах и формулах. – Москва : Дрофа, 2002. – 432 с., гл. 2.14. - С.71. - Текст : непосредственный.

Работа № 8. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ ТЕПЛОЁМКОСТЕЙ C_p/C_v ВОЗДУХА МЕТОДОМ АДИАБАТИЧЕСКОГО РАСШИРЕНИЯ

Цель работы: изучить метод адиабатического расширения для определения отношения теплоемкостей воздуха C_p/C_v и найти значение этого отношения.

Оборудование: прибор для определения отношения C_p/C_v воздуха методом адиабатического расширения, манометр, насос.

Краткие теоретические сведения

Элементарное количество теплоты dQ , сообщаемое телу при изменении его температуры от T до $T+dT$, определяется формулой

$$dQ = C_T dT, \quad (1)$$

где C_T - теплоемкость тела; dT – изменения температуры. Из уравнения (1) следует, что

$$C_T = \frac{dQ}{dT}. \quad (2)$$

Теплоемкость есть величина, равная количеству теплоты, которое нужно сообщить телу, чтоб изменить его температуру на один кельвин. Теплоемкость тела зависит от размеров, от его массы, химического состава и состояния.

Различают удельную c и мольную C теплоемкости. Удельной теплоемкостью называется количество теплоты, которое нужно сообщить единице массы тела, чтобы изменить его температуру на один кельвин. Если тело однородно, то

$$c = \frac{dQ}{m dT}, \quad (3)$$

где m - масса тела.

В термодинамике часто используется мольная теплоемкость C - так называют теплоемкость одного моля вещества или количество теплоты, которое нужно сообщить одному молю тела, чтобы изменить его температуру на один кельвин

$$C = \frac{dQ}{\nu dT}, \quad (4)$$

где ν - число молей данного тела.

Между мольной и удельной теплоемкостями существует простая связь

$$C = c \mu, \quad (5)$$

где μ - мольная масса вещества.

Из опыта следует, что количество теплоты, а значит и теплоемкость C зависит от вида динамического процесса, изменяющего состояние системы. С физической точки зрения различают теплоемкости при постоянном объеме c_v (удельная) и C_v (мольная) и при постоянном давлении c_p (удельная) и C_p (мольная). В случае нагревания газа при постоянном объеме сообщенная ему теплота целиком идет на увеличение внутренней энергии ΔU этого газа, так как при неизменном объеме внешняя работа не совершается. Мольную теплоемкость при постоянном объеме C_v в данном процессе определяют соотношением

$$C_v = \left(\frac{\Delta U}{\Delta T} \right)_v. \quad (6)$$

Если же газ нагревать при постоянном давлении, то изменится внутренняя энергия ΔU системы, и кроме того, газ, расширяясь при повышении температуры, совершает работу $p \Delta V$ против внешнего давления. И тогда мольную теплоемкость при постоянном давлении в данном процессе определяют соотношением

$$C_p = \left(\frac{\Delta U + p \Delta V}{\Delta T} \right)_p. \quad (7)$$

Разность $C_p - C_v$ выражает работу против внешнего давления, производимую газом при нагревании на один кельвин

при постоянном давлении. Для одного моля газа эта величина равна универсальной газовой постоянной R , т.е.

$$C_p - C_v = R. \quad (8)$$

Соотношение (8) называется уравнением Майера. Для любого вещества можно определить характерную для этого вещества величину γ (показатель адиабаты), равную

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v}. \quad (9)$$

Для идеального газа расчет теплоемкостей C_p и C_v может быть сделан теоретически. Исходя из представлений молекулярно - кинетической теории газов следует считать, что полная беспорядочность движений и столкновений молекул приводит к распределению внутренней энергии в среднем поровну между всеми степенями свободы молекул. Под числом степеней свободы i молекул понимают число независимых величин, определяющих ее движение (поступательное, вращательное, колебательное). Так же равномерно между всеми степенями свободы распределяется энергия, приобретенная молекулами при нагревании системы. Так как энергия поступательного движения молекул одного моля идеального газа равна

$$U = \frac{3}{2} RT, \quad (10)$$

то каждая молекула обладает тремя степенями свободы и на каждую степень свободы молекулы приходится энергия E_1 , равная

$$E_1 = (1/2)kT, \quad (11)$$

где k – постоянная Больцмана.

Исходя из рассмотренного, следует, что, например, молекула двухатомного газа имеет наряду с тремя степенями свободы поступательного движения еще две степени свободы вращательного движения и общее число степеней свободы, равное $i = 5$. А молярные теплоемкости C_v и C_p такого газа равны

$$C_v = \frac{5}{2} R; \quad C_p = \frac{7}{2} R. \quad (12)$$

Если молекула газа состоит из трех и более атомов, то она имеет шесть степеней свободы ($i = 6$) и мольные теплоемкости для таких газов равны

$$C_V = 3 R; \quad C_p = 4 R. \quad (13)$$

В тех случаях, когда между частицами вещества существуют силы взаимодействия (реальный газ, твердое тело и т. д.), необходимо рассматривать не только кинетическую энергию частиц, но и их взаимную потенциальную энергию, а также энергию колебаний атомов. При этом одна колебательная степень свободы включает и кинетическую, и потенциальную энергию, что составляет $E_k = kT$. Поэтому среднее значение энергии колебаний, рассчитанное на 1 моль данного вещества, равно RT .

Колебательное движение молекул в двухатомных и многоатомных реальных газах заметно проявляются только при достаточно высоких температурах. В связи с этим, для многих газов при расчетах их теплоемкостей в обычных условиях энергию колебательных степеней свободы можно не учитывать. Знаменательно, что случай $i = 4$, которому не соответствует никакая молекулярная симметрия, действительно в природе не реализуется.

В ряде практических и теоретических вопросов физики большое значение имеет отношение теплоемкостей $C_p/C_V = \gamma$. В частности, для идеальных газов γ входит в уравнение Пуассона

$$pV^\gamma = \text{const}, \quad (14)$$

описывающее адиабатический процесс, т.е. процесс, происходящий без теплообмена с окружающей средой. Практически - адиабатическим процессом можно считать быстрое сжатие или разряжение газа.

Экспериментальная установка и методика определение C_p/C_V воздуха

Экспериментальное определение C_p/C_V воздуха можно осуществить на установке, изображенной на рис. 1 (прибор Клемана-Дезорма).

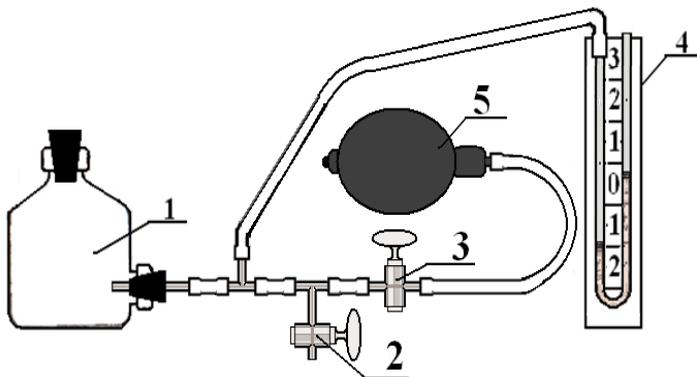


Рис.1. Прибор Клемана-Дезорма.

1 – сосуд с газом (воздух); **2** – кран (связь с атмосферой); **3** – кран (подача газа от насоса); **4** – манометр; **5** – насос (груша).

Стекланный сосуд (**1**) соединен с манометром (**4**) и насосом (**5**). С помощью крана (**2**) сосуд сообщается с атмосферой, а через кран (**3**) связан с насосом (**5**).

Если открыть кран (**3**) и накачать в сосуд небольшое количество воздуха, то давление и температура в нем повысятся. Через некоторое время (8 - 10 минут), когда температура воздуха в сосуде станет равной комнатной T_1 , в нем установится давление p_1 (состояние 1), равное

$$p_1 = p_a + \Delta p_1, \quad (15)$$

где p_a – атмосферное давление; Δp_1 - увеличение давления, измеряемое манометром (**4**).

На рис. 2 это состояние изображается точкой 1.

Затем на короткое время открывают кран (**2**) и быстро его закрывают, как только уровни жидкости в манометре сравняются. При открытом кране (**2**) за малый промежуток времени происходит расширение газа, поэтому данный процесс можно считать адиабатическим. Вследствие адиабатического расширения, давление газа в сосуде станет равным атмосферному p_a , а его температура опустится ниже комнатной T_1 и станет равной T_2 (состояние 2 - точка 2 на рис.2).

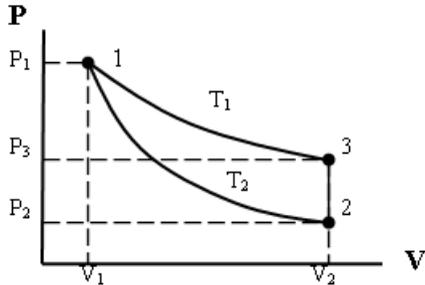


Рис. 2. Состояния газа.

1 – первое состояние газа ($p_1V_1T_1$); 2 – второе состояние газа ($p_2V_2T_2$); 3 – третье состояние газа ($p_3V_3T_3$).

С течением времени (8 - 10 минут), температура газа в сосуде (1) будет повышаться за счет нагревания от теплого комнатного воздуха, и достигнет комнатной T_1 . Давление газа из-за этого нагревания тоже будет повышаться от p_a до значения p_2 (состояние 3 – точка 3 на рис.2), равного

$$p_2 = p_a + \Delta p_2, \quad (16)$$

где Δp_2 - показание манометра (4).

Переход из состояния 1 в состояние 2 (адиабатический процесс) подчиняется уравнению Пуассона (14), которое для данного случая, с учетом уравнения Менделеева-Клапейрона, принимает вид

$$\left(\frac{p_1}{p_a} \right)^{\gamma-1} = \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^{\gamma}. \quad (17)$$

Переход из состояния 2 в состояние 3 происходит при постоянном объеме и описывается уравнением изохоры $p/T = \text{const}$, согласно которому

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{p_2}{p_a}. \quad (18)$$

Исключение из уравнений (17) и (18) температуры приводит к равенству

$$\left(\frac{p_1}{p_a}\right)^{\gamma-1} = \left(\frac{p_2}{p_a}\right)^{\gamma}. \quad (19)$$

Подставляя в соотношение (19) значения p_1 и p_2 из формул (15) и (16) получают

$$\left(1 + \frac{\Delta p_1}{p_a}\right)^{\gamma-1} = \left(1 + \frac{\Delta p_2}{p_a}\right)^{\gamma}. \quad (20)$$

Так как в условиях опыта величины $\Delta p_1 / p_2$ и $\Delta p_1 / p_a$ значительно меньше единицы, то с достаточной степенью точности можно ограничиться лишь двумя первыми членами биномов равенства (20). В этом случае равенство (20) сводится к виду

$$1 + \frac{\Delta p_1}{p_a}(\gamma - 1) = 1 + \frac{\Delta p_2}{p_a} \gamma. \quad (21)$$

Откуда для γ получают соотношение

$$\gamma = \frac{\Delta p_1}{\Delta p_1 - \Delta p_2}. \quad (22)$$

Таким образом, измеряя с помощью манометра (4) на рассмотренной установке значения Δp_1 и Δp_2 можно определить величину отношения C_p/C_v воздуха.

Измерения и обработка результатов

Задание 1. Измерить значения давлений Δp_1 и Δp_2 .

Для этого закройте кран (2) и откройте кран (3). С помощью насоса (5) увеличьте давление в сосуде (1), после чего перекройте кран (3). Выждав пока столбики жидкости в манометре (4) перестанут перемещаться, сделайте отсчет значения Δp_1 .

На короткое время откройте кран (2), соединив сосуд (1) с атмосферой, и как только уровни жидкости в манометре (4) сравняются (что происходит очень быстро), кран (2) закройте.

После этого нужно подождать пока уровни столбиков жидкости в манометре (4) перестанут изменяться провести измерение значения Δp_2 .

Повторите опыт не менее 5 раз.

Задание 2. Рассчитать значение C_p/C_V для воздуха, пользуясь формулой (22).

Результаты измерений и вычислений занесите в таблицу 1.

Задание 3. Считая воздух двухатомным газом, получить теоретическое значение $\gamma_{теор}$.

Сопоставьте полученное вами экспериментальное значение $\gamma_{эксп}$ для воздуха с теоретическим значением $\gamma_{теор}$. Вывод запишите в отчет.

Оцените погрешности измерений.

Таблица 1. Результаты определения отношения C_p/C_V для воздуха

№ измерения	Δp_1 , Па	Δp_2 , Па	$\gamma_{эксп}$	$\gamma_{ср}$	$\gamma_{теор}$
1.					
2.					
3.					
4.					
5.					

Сделайте вывод, подготовьте отчет.

Контрольные вопросы

1. Определение внутренней энергии газа, понятия работы и теплоты.
2. Первый закон термодинамики.
3. Изохорический, изобарический, изотермические процессы. Запишите их уравнения, графики.

4. Что называется степенью свободы молекулы? От чего зависит число степеней её свободы?
5. Определение мольной и удельной теплоемкостей газа. Связь между ними.
6. Как определить момент уравнивания температуры воздуха, заключенного в сосуде (1), с температурой окружающего воздуха при 1 и 3 состояниях?
7. Целесообразно ли жидкость, налитую в манометр (4), заменить ртутью?
8. От чего и как зависят погрешности определения C_p/C_v воздуха рассмотренным методом?

Литература

1. Детлаф, А. А. Курс физики : учебное пособие для студентов вузов / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский. – Москва : Академия, 2005. – 720 с., гл. 9. - С. 117 – 122. – Текст : непосредственный.
2. Зисман, Г. А. Курс общей физики : учебное пособие : [в 3-х томах] / Г. А. Зисман, О. М. Тодес. – Санкт-Петербург : Лань, 2011. - Т. 1. Механика. Молекулярная физика. Колебания и волны. – 352 с., гл. 8. – С. 145 – 160. – Текст : непосредственный.
3. Макаренко, Г. М. Физика. - Минск : Дизайн ПРО, 1997. – Т. 1 Механика. Основы молекулярной физики и термодинамики. - 176 с., гл. 9. – С. 113 – 122. - Текст : непосредственный.
4. Савельев, И. В. Курс общей физики: учебное пособие для студентов вузов : [в 3-х томах]. – Санкт – Петербург : Лань, 2005. – Т.1. Механика. Молекулярная физика 432 с., гл. 10. – С. 277 - 280. – Текст : непосредственный.
5. Трофимова, Т. И. Физика в таблицах и формулах. – Москва : Дрофа, 2002. – 432 с., гл. 2.49. - 2.53. – С.88. – 90. - Текст : непосредственный.

Работа № 9. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ ТЕПЛОЁМКОСТИ ТВЕРДОГО ТЕЛА

Цель работы: проверка закона Дюлонга и Пти для некоторых металлов при заданной температуре.

Приборы и принадлежности: калориметр, термометр, секундомер, весы с разновесами, исследуемые металлы.

Краткие теоретические сведения

В твердых кристаллических телах атомы или ионы, находящиеся в узлах кристаллической решетки, совершают малые колебания около положения равновесия с частотой ν . Считая, колебания отдельных атомов независимыми друг от друга и принимая, что $kT \gg hv$ (k – постоянная Больцмана; h – постоянная Планка; T – абсолютная температура) определяют теплоемкость одного моля кристалла.

Каждый атом можно считать осциллятором, имеющим три колебательные степени свободы. Применяя классическую теорему о равномерном распределении энергии по степеням свободы частиц, получают для внутренней энергии U_0 одного моля вещества, равенство

$$U_0 = 3N_A kT, \quad (1)$$

где N_A – число Авогадро; k – постоянная Больцмана.

Откуда мольная теплоемкость C_V этого вещества при постоянном объеме равна

$$C_V = \frac{dU_0}{dT} = 3N_A k = 3R, \quad (2)$$

где $R = N_A k$ – универсальная газовая постоянная, равная $8,314 \frac{\text{Дж}}{\text{моль}\cdot\text{К}}$.

Соотношение (2) носит название закона Дюлонга и Пти, согласно которому все твердые тела имеют одну и ту же

молярную теплоемкость $C_V = 3R = 24,93 \text{ Дж}/(\text{моль}\cdot\text{К})$, не зависящую от температуры.

Эксперименты показали, что при температурах, близкой к комнатной и выше, большинство твердых тел достаточно хорошо подчиняются этому закону. Однако в области низких температур теплоемкость твердых тел $C_V \neq 3R$. Она убывает с понижением температуры, причем при $T \rightarrow 0 \text{ К}$ $C_V \rightarrow 0$, что противоречит закону Дюлонга и Пти. И объяснить это несоответствие оказалось можно только методами квантовой механики.

Целью данной работы является измерение удельной теплоемкости c с твердого тела при температурах выше комнатной

$$c = \frac{C}{\mu}. \quad (3)$$

Методика проведения эксперимента заключается в следующем. Исследуемое тело нагревается в калориметре. Сначала измеряют за определенное время приращение температуры в калориметре, не содержащем твердого тела, затем - в калориметре с исследуемым телом. При этом количество теплоты, поступающее в калориметр и в том и другом случае должно быть одинаково. При отсутствии теплообмена с окружающей средой эти зависимости должны быть линейными. В реальных же условиях происходят тепловые потери в окружающую среду, эти потери нужно учитывать при проведении эксперимента.

Для нагревания калориметра с водой без исследуемого тела на ΔT кельвин требуется время t_1 , а для нагревания того же калориметра с твердым телом на те же ΔT кельвин необходимо большее время t_2 . Удельная теплоемкость исследуемого вещества при проведении такого опыта может быть определена из уравнения теплового баланса.

Однако, нахождение величины c в этом случае усложняется из-за необходимости использования электрического нагревателя в калориметре. Чтобы этого не делать в рассматриваемой

лабораторной работе для определения величины c твердого тела просто используется горячая вода с известной температурой.

Описание экспериментальной установки

Для определения удельной теплоёмкости какого-либо исследуемого металла предлагается использовать калориметр, конструкция которого показана на рис. 1. Калориметр представляет собой камеру (3) с двумя стенками, между которыми находится либо разряженный воздух, либо материал, плохо проводящий теплоту (4). Крышка (1) калориметра сделана из прозрачного материала (плексиглас) также с двумя стенками, между которыми находится воздух, имеющий низкую теплопроводность. В крышку вставлен термометр (7) для измерения температуры в калориметре и устройство (2) для перемешивания жидкости в нем.

В калориметр наливают нагретую жидкость (вода) (6) измеряют ее температуру термометром (7) и опускают изучаемое твердое тело (5), в котором нужно определить неизвестную величину удельной теплоемкости.

Одна часть теплоты воды идет на нагревание твердого тела, а другая часть – рассеивается в процессе теплообмена в окружающую среду.

Если через t секунд температура горячей воды в калориметре (без твердого тела) уменьшится на ΔT кельвин, то можно определить тепловые потери воды и калориметра, если известна масса воды в калориметре.

В калориметр без твердого тела наливают горячую с температурой T_1 воду массой m_v и включают мешалку, например, на $t = 10$ минут. За это время температура воды в калориметре понизится до значения T_2 . Это снижение температуры воды позволяет определить тепловые потери калориметра $Q_{тп}$ за истекшее время $t = 10$ минут

$$Q_{тп} = m_v c_v (T_1 - T_2). \quad (4)$$

После этого воду из калориметра сливают и оставляют его на некоторое время (на 10-15 минут) для стабилизации температуры до величины T , т.е до начальной комнатной. Затем в калориметр опускают исследуемое твердое тело, имеющее температуру T_1 , и заливают новую порцию горячей воды массы m_B и температуры T_1 , что и в первом опыте. Закрывают калориметр крышкой и включают секундомер на $t = 10$ минут. По прошествии этого времени фиксируют показание термометра T_T , определяющего температуру воды в калориметре, содержащем исследуемое твердое тело.

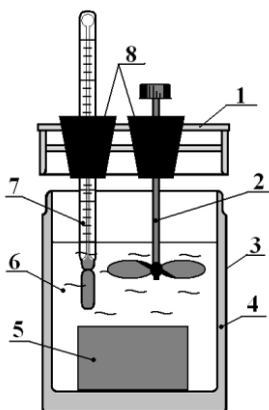


Рис. 1. Калориметр с исследуемым телом.

1 – крышка; 2 – мешалка; 3 – корпус калориметра; 4 – наполнитель; 5 – исследуемое твердое тело; 6 – жидкость; 7 – термометр; 8 – уплотнители.

Используя полученные данные, а также значение массы m_T твердого тела, полученное путем его взвешивания, составляют уравнение теплового баланса с учетом тепловых потерь – см формулу (3)

$$Q_1 - Q_{тп} = Q_{тT}, \quad (5)$$

где

$$Q_1 = m_B c_B (T_1 - T_T); \quad (6)$$

$$Q_{тT} = m_T c (T_T - T). \quad (7)$$

Тогда уравнение (4) принимает вид

$$m_b c_b (T_1 - T_T) - m_s c_s (T_1 - T_2) = m_T c (T_T - T). \quad (8)$$

Из соотношения (7) находят величину c для твердого тела

$$c = \frac{m_b c_b (T_2 - T_T)}{m_T (T_T - T)}. \quad (9)$$

По формуле (8) используя, полученные в ходе эксперимента данные для массы воды m_b , массы исследуемого твердого тела m_T , для удельной теплоемкости воды c_b , а также для комнатной температуры T , для температуры горячей воды T_1 , для температуры воды T_2 в конце первого опыта (без исследуемого твердого тела) и для температуры твердого тела и воды T_T в конце второго опыта, рассчитывают искомое значение удельной теплоемкости c , изучаемого твердого тела.

Измерения и обработка результатов

Задание 1. Провести измерения тепловых потерь калориметра.

В соответствии с формулой (3) определите тепловые потери калориметра. Для этого в калориметр залейте горячую воду, закройте крышку и включите мешалку, измеряете температуру T_1 и массу m_b горячей воды в калориметре. Включите секундомер на 10 минут и измерьте температуру T_2 воды в калориметре.

Слейте воду из калориметра и приготовьте его для проведения опыта с использованием исследуемого твердого тела.

Постройте таблицу и заносите в нее полученные результаты.

Задание 2. Провести измерения удельной теплоемкости исследуемых твердых тел.

В калориметр помещаете исследуемое твердое тело массой m_T и температурой T , заливааете то же самое, известное вам после первого опыта количество горячей воды массой m_b с температурой T_1 , закрываете его крышкой, включаете мешалку и секундомер на время $t = 10$ минут, по истечении которого

фиксируете температуру T_T воды в калориметре. Полученные результаты занесите в таблицу

Задание 3. По формуле (8), используя полученные в ходе эксперимента данные, рассчитать искомое значение удельной теплоемкости c , изучаемого твердого тела.

Полученные результаты измерений и расчетов внесите в таблицу.

Результаты измерений величины c сравните с табличными значениями и с теоретическими величинами, полученными по закону Дюлонга и Пти.

Оцените погрешности измерений.

Таблица 1. Результаты измерений и расчетов.

№ п/п	m_b , кг	M_T , кг	C_b , Дж/кг	T_1 , К	T_2 , К	T_T , К	c , Дж/кг	$c_{ср}$, Дж/кг
1								
2								
3								

Сделайте вывод, подготовьте отчет.

Контрольные вопросы

1. Что представляет собой удельная теплоемкость тела?
2. Как формулируется закон Дюлонга и Пти?
3. Почему существуют отклонения от закона Дюлонга и Пти? Чем они объясняются?
4. От чего и как зависит удельная теплоемкость твердого тела?
5. Как можно опытным путем определить величину удельной теплоемкости твердого тела?
6. Каковы основные положения классической теории теплоемкости твердых тел?
7. Рассчитайте мольную теплоемкость C_m поваренной соли NaCl по классической теории.
8. Какие явления не может объяснить классическая теория теплоемкости твердых тел?

Литература

1. Лабораторный практикум по общей и экспериментальной физике: учебное пособие для студентов /В. Н. Александров и другие под ред. Е. М. Гершензона и А. Н. Мансурова. – Москва : Академия, 2004. – С. 388 - 391. - Текст : непосредственный.
2. Гершензон, Е. М. Курс общей физики. Молекулярная физика./ Гершензон, Е. М., Малов, Н. Н., Мансуров, А. Н. – Москва : Академия, 2000. - § 10.8 - 10.10. - Текст : непосредственный.
3. Сивухин, Д. В. Курс общей физики. Т.2. – Москва : Наука, 1989. - § 68, 69. - Текст : непосредственный.
4. Детлаф, А. А. Курс физики : учебное пособие для студентов вузов / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский. – Москва : Академия, 2005. – 720 с., гл. 9. - С. 118 – 122. – Текст : непосредственный.
5. Зисман, Г. А. Курс общей физики : учебное пособие : [в 3-х томах] / Г. А. Зисман, О. М. Тодес. – Санкт-Петербург : Лань, 2011. - Т. 1. Механика. Молекулярная физика. Колебания и волны. – 352 с., гл. 12. – С. 245 – 250. – Текст : непосредственный.
6. Савельев, И. В. Курс общей физики: учебное пособие для студентов вузов : [в 3-х томах]. – Санкт – Петербург : Лань, 2005. – Т.1. Механика. Молекулярная физика 432 с., гл. 13. – С. 369 - 370. – Текст : непосредственный.
7. Трофимова, Т. И. Физика в таблицах и формулах. – Москва : Дрофа, 2002. – 432 с., гл. 2.102. - 2.103. – С.122.- 123
Текст : непосредственный.
8. 1. Грабовский, Р. И. Курс физики : учебное пособие - Санкт – Петербург : Лань, 2009. - 608 с., гл. 9. - С. 179 -180. - Текст : непосредственный.

Работа № 10. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ СПОСОБОМ РЕБИНДЕРА

Цель работы: ознакомиться с методом максимального давления в газовом пузырьке для определения поверхностного натяжения жидкости. Изучить устройство и принцип действия установки и

найти значение поверхностное натяжение воды по способу Ребиндера.

Приборы и принадлежности: прибор Ребиндера для измерения поверхностного натяжения жидкости, термометр, дистиллированная вода.

Краткие теоретические сведения

В жидкостях среднее расстояния между молекулами меньше, чем в газах. Поэтому силы взаимодействия между молекулами играют в жидкостях существенную роль. В поверхностном слое жидкости имеет место нескомпенсированность молекулярных сил: частицы жидкости, находящиеся в этом слое, испытывают направленную внутрь силу притяжения остальной части жидкости. В результате, согласно модели Ван-дер-Ваальса, поверхностный слой жидкости оказывает на нее значительное внутреннее давление, достигающего десятков тысяч атмосфер. Одним из ярких проявлений внутреннего давления является очень малая сжимаемость жидкостей. Измерить это внутреннее давление на опыте не удастся, поскольку оно всегда направлено внутрь жидкости, перпендикулярно её поверхности, не действует на стенки сосуда и на тела, погруженные в жидкость. Рассмотрим вопрос об энергии поверхностного слоя жидкости. Частицы этого слоя имеют кинетическую энергию теплового движения и потенциальную энергию, обусловленную силами межмолекулярного взаимодействия. Средняя кинетическая энергия частиц зависит от температуры. В случае равновесного состояния температура постоянна по всему объему жидкости. В связи с этим значения кинетической энергии молекул поверхностного слоя и молекул, находящихся внутри жидкости, в среднем одинаковы. Иначе обстоит дело с поверхностной энергией. При переходе молекул из внутренних частей жидкости на ее поверхность они должны совершить работу против направленных внутрь жидкости сил притяжения со стороны других частиц жидкости. Эта работа идет на увеличение потенциальной энергии молекул, переходящих в поверхностный слой. Величина данной энергии E завит от

числа поверхностных молекул, т.е. от площади S поверхности и носит название поверхностной энергии. Ее значение равно

$$E = \sigma S, \quad (1)$$

где σ - поверхностное натяжение. В данном случае σ представляет собой энергию, которую необходимо затратить, чтобы увеличить поверхность жидкости на единицу площади.

Наличие поверхностной энергии сильно сказывается на поведении жидкости. В частности, форма которую принимает жидкость, соответствует минимуму потенциальной энергии, складывающейся из энергии поверхностного слоя и потенциальной энергии в поле тяжести. В результате, в состоянии невесомости жидкость принимает форму шара, а при наличии сил тяготения – вид приплюснутой капли. По той же причине в сосудах (трубках) свободная поверхность жидкости около стенок искривляется, образуя так называемый мениск – вогнутый, если жидкость смачивает стенки, или выпуклый, если жидкость стенки не смачивает.

При расчетах вместо энергии поверхностного натяжения нередко пользуются силой поверхностного натяжения, которая может быть введена следующим образом. Для изотермического увеличения поверхности жидкости на величину dS необходимо затратить энергию dE равную

$$dE = \sigma dS = \sigma \ell dx, \quad (2)$$

где ℓ - длина участка некоторой мысленно проведенной линии AA на поверхности жидкости (рис. 1); увеличение поверхности происходит вследствие ее «растяжения» на величину dx в направлении перпендикулярном линии AA . Силу F поверхностного натяжения формально можно определить следующим образом

$$F = -\frac{dE}{dx} = -\sigma \frac{dS}{dx} = -\sigma \ell, \quad (3)$$

где знак минус указывает на то, что сила F направлена в сторону, противоположную смещению dx .

Таким образом, величину F можно рассматривать как некоторую силу постоянной линейной плотности σ , которая

действует перпендикулярно произвольной линии AA и стремится «стянуть» разделенные этой линией участки 1 и 2 поверхности жидкости. Поверхностное натяжение жидкости оказывается равным

$$\sigma = \frac{F}{\ell}. \quad (4)$$

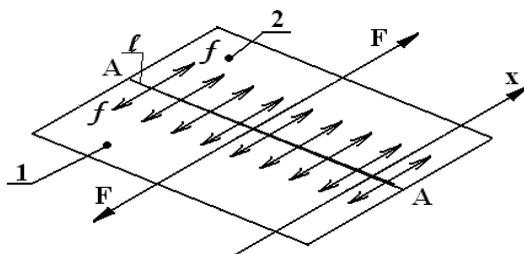


Рис.1. К определению поверхностного натяжения.

AA = ℓ – линия в поверхностном слое жидкости; f – силы, действующие на молекулы жидкости, находящиеся на линии AA; 1 и 2 – участки поверхности жидкости.

Измеряется величина σ в системе СИ в единицах 1 Н/м и 1 Дж/м², что численно совпадает – т.е. поверхностное натяжение можно выразить как силу на единицу длины (см. формулу 4) или как энергию на единицу площади (см. формулу 1).

Величина поверхностного натяжения зависит от вида жидкости, её температуры, а так же от наличия в ней примесей. Примеси, которые приводят к уменьшению σ , называются поверхностно-активными веществами ПАВ. Примеси, вызывающие увеличение σ жидкости, называются поверхностно-инактивными веществами ПИВ.

Существуют различные способы экспериментального измерения поверхностного натяжения жидкостей – метод капиллярного поднятия, метод отрыва кольца от поверхности жидкости, метод лежащей капли, метод висящей капли, метод счета падающих капель, метод максимального давления в газовом пузырьке и другие.

Описание установки и метода определения σ жидкости

В данной работе для определения поверхностного натяжения жидкостей используется метод максимального давления в газовом пузырьке способом П.А.Ребиндера, основанный на применении формулы Лапласа, определяющей давление Δp искривленной поверхности жидкости, возникающей благодаря действию сил поверхностного натяжения

$$\Delta p = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right), \quad (5)$$

где R_1 и R_2 - радиусы кривизны двух любых взаимно перпендикулярных нормальных к поверхности сечений в рассматриваемой точке.

Если мениск представляет собой часть сферической поверхности и $R_1 = R_2$, то добавочное давление Лапласа определяется по формуле

$$\Delta p = \frac{2\sigma}{R}, \quad (6)$$

где R - радиус сферической поверхности.

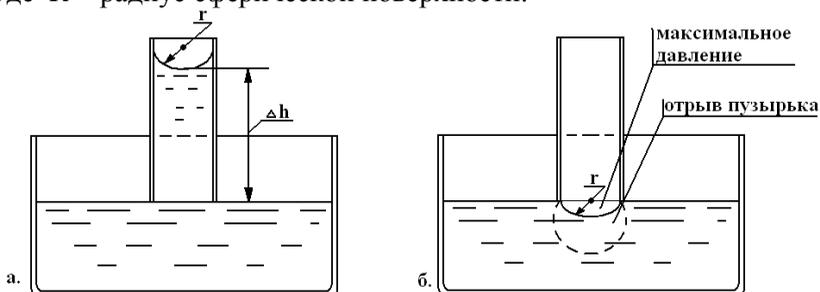


Рис. 2. Формирование газового пузырька.

а – капиллярное поднятие Δh ; б – образование и отрыв газового пузырька; r – радиус капилляра, мениска, полусферы пузырька в случае тонкого капилляра.

В капиллярной трубке уровень Δh жидкости благодаря поднятию её из-за добавочного давления, заметно отличается от уровня жидкости в сосуде (рис. 2 а). Если в верхнем конце

такого капилляра увеличить давление газа, то уровень жидкости в нем будет опускаться и при некотором давлении на нижнем конце капилляра начнет образовываться пузырек газа (рис. 2 б). Если радиус капилляра достаточно мал, то образующийся газовый пузырек постепенно достигнет полусферической поверхности радиусом, равным радиусу капилляра (см. рис. 2 б).

Очевидно, что в этот момент добавочное давление Лапласа, определяемое формулой (6), будет равно

$$\Delta p = \frac{2\sigma}{r}, \quad (7)$$

где r - радиус капилляра. Давление ΔP в капилляре с учетом высоты Δh капиллярного поднятия жидкость (см. рис. 2) определится соотношением

$$\Delta p = \rho g \Delta h, \quad (8)$$

При дальнейшем повышении давления газа в капилляре радиус пузырька становится больше чем r , добавочное давление в нем уменьшается и уже не уравнивает давление газа в капилляре, вследствие этого пузырек отрывается от капилляра и всплывает. Наибольшее давление газа в капилляре возникает, следовательно, в тот момент, когда происходит отрыв пузырька, и определяется соотношением (8). Если капилляр только касается поверхности жидкости - что соответствует способу Ребиндера для определения σ жидкости, то в момент отрыва пузырька, с учетом равенств (7) и (8)

$$\rho g \Delta h = \frac{2\sigma}{r}. \quad (9)$$

Величины Δh и r для данного капилляра можно измерить на опыте и тогда по формуле (9) легко находят величину поверхностного натяжения σ исследуемой жидкости при температуре исследования, когда известна плотность ρ этой жидкости

$$\sigma = \frac{\rho g \Delta h r}{2}. \quad (10)$$

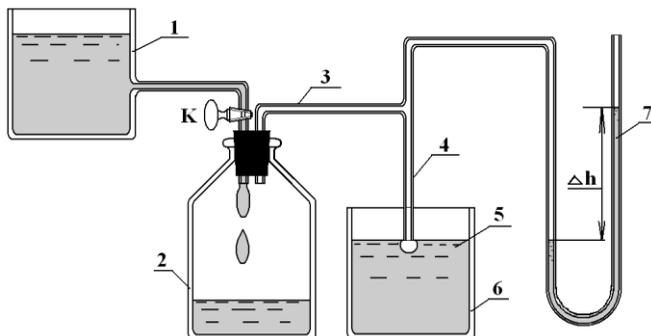


Рис. 3. Схема установки для определения σ жидкости способом Ребиндера. 1 - резервуар с водой; 2 – закрытый сосуд; 3, 4 – трубки; 5 – вода; 6 - сосуд; 7 – манометр.

Схема установки для определения поверхностного натяжения жидкости по способу Ребиндера показана на рис. 3. При втекании воды через кран К из резервуара (1) в закрытый сосуд (2) давление воздуха в нем постепенно увеличивается и передается по трубке (3) в капилляр (4), конец которого касается уровня исследуемой жидкости (5), налитой в сосуд (6). Давление в капилляре определяется по высоте Δh в манометре (7). Когда с капилляра (4) отрывается пузырек воздуха, давление в нем имеет максимальное значение. Таким образом, измерив Δh , зная r капилляра и ρ жидкости можно вычислить, пользуясь формулой (10), значение поверхностного натяжения исследуемой жидкости.

Измерения и обработка результатов

Задание 1. Ознакомиться с методом максимального давления в газовом пузырьке для определения поверхностного натяжения жидкости способом Ребиндера.

Задание 2. Изучить устройство и принцип действия прибора Ребиндера для определения поверхностного натяжения жидкости методом максимального давления в газовом пузырьке.

Задание 3. Определить σ воды при 3 - 5 различных температурах.

Для каждого случая опыт проводите не менее 3 раз, доводя время формирования пузырька на капилляре до 1,5 - 2 минут. Величину плотности воды при изучаемой температуре находите, пользуясь графиком, представленным на рис. 4.

Задание 4. По полученным данным построить график зависимости σ воды от температуры.

Результаты измерений и расчетов сведите в таблицу 1. Рассчитайте величину погрешностей.

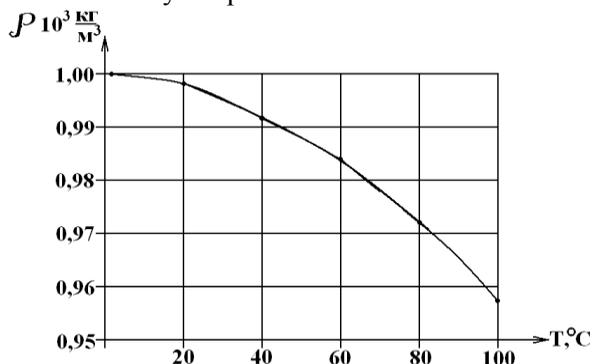


Рис.4. Зависимость ρ воды от T на линии насыщения.

Таблица 1. Результаты измерений поверхностного натяжения воды.

$T, ^\circ\text{C}$	№ опыта	$\Delta h, \text{ м}$	$\rho, \text{ кг/м}^3$	$\sigma, 10^{-3} \text{ Н/м}$	$\sigma_{\text{ср}}, 10^{-3} \text{ Н/м}$
$T_1 =$					
$T_2 =$					
$T_3 =$					
$T_4 =$					
$T_5 =$					

Сделайте вывод, подготовьте отчет.

Контрольные вопросы

1. Как объясняется явление поверхностного натяжения жидкости.
2. Определение поверхностного натяжения жидкости.
3. Основные методы определения поверхностного натяжения жидкости.
4. Силы, возникающие на искривленной поверхности жидкости.
5. Как зависит поверхностное натяжение от температуры?
6. Как влияют примеси на поверхностное натяжение жидкости?
7. Что такое капиллярность, и какое значение имеет капиллярное поднятие в природе и технике?

Литература

1. Кикоин, А. К. Молекулярная физика : учебное пособие для студентов вузов / Кикоин, А. К., Кикоин, И. К. – Москва : Наука, 1976. – гл. 7, § 98 – 103. - Текст : непосредственный.
2. Сивухин, Д. В. Курс общей физики. Т.2. – Москва : Наука, 1989. - § 68, 69. - Текст : непосредственный.
3. Зисман, Г. А. Курс общей физики : учебное пособие : [в 3-х томах] / Г. А. Зисман, О. М. Тодес. – Санкт-Петербург : Лань, 2011. - Т. 1. Механика. Молекулярная физика. Колебания и волны. – 352 с., гл. 11. – С. 210 – 234. – Текст : непосредственный.
4. Савельев, И. В. Курс общей физики: учебное пособие для студентов вузов : [в 3-х томах]. – Санкт – Петербург : Лань, 2005. – Т.1. Механика. Молекулярная физика 432 с., гл. 14. – С. 371 - 383. – Текст : непосредственный.
5. Трофимова, Т. И. Физика в таблицах и формулах. – Москва : Дрофа, 2002. – 432 с., гл. 2.102. - 2.103. – С.122. – 123. - Текст : непосредственный.
6. 1. Грабовский, Р. И. Курс физики : учебное пособие - Санкт – Петербург : Лань, 2009. - 608 с., гл. 9. - С. 191 -202. - Текст : непосредственный.

Работа № 11 . ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ И СРЕДНЕЙ ДЛИНЫ СВОБОДНОГО ПРОБЕГА МОЛЕКУЛ ВОЗДУХА

Цель работы: изучить принцип действия и устройство капиллярного вискозиметра; определить коэффициент вязкости и среднюю длину свободного пробега молекулы воздуха.

Приборы и принадлежности: капиллярный вискозиметр, секундомер, стеклянный стакан.

Краткие теоретические сведения

При движении слоев реального газа с различными скоростями между ними действуют силы F внутреннего трения (вязкости). Величину сил вязкости можно определить по формуле Ньютона

$$F = \eta \frac{d v}{d x} S, \quad (1)$$

где η - коэффициент внутреннего трения (коэффициент динамической вязкости или просто вязкость); S - площадь соприкасающихся слоев газа; $\frac{d v}{d x}$ - градиент скорости.

Коэффициент вязкости η из формулу (1) принимает вид

$$\eta = \frac{F}{\frac{d v}{d x} S}, \quad (2)$$

т.е. он численно равен силе внутреннего трения, возникающей между двумя слоями газа, имеющими площадь соприкосновения, равную единице, при единичном градиенте скорости. В системе СИ величина η измеряется в Па.с.

С точки зрения молекулярно-кинетической теории внутреннее трение обусловлено передачей импульса от частиц одного слоя газа к частицам другого, поэтому коэффициент вязкости газа равен количеству упорядоченного движения, переносимого за единицу

времени через единицу площади соприкасающихся слоев при градиенте скорости, равном единице.

Характер течения газа зависит от его скорости. При малых скоростях газа течение является ламинарным (слоистым). Слои газа при ламинарном течении скользят, относительно друг друга не перемешиваясь. С увеличением скорости потока газа слои перемешиваются и течение становится турбулентным. При этом скорости частиц газа все время изменяются и по величине и по направлению беспорядочным образом.

Для ламинарного и турбулентного движений газа существуют определенные значения числа Рейнольдса R_e , которые вычисляют по формуле

$$R_e = \frac{\rho r v_{cp}}{\eta}, \quad (3)$$

где R_e - число Рейнольдса; ρ - плотность газа; r - радиус трубки; v_{cp} - средняя (по сечению трубки) скорость течения газа.

Величину средней скорости течения газа через капилляр можно определить по формуле

$$v_{cp} = \frac{V}{St}, \quad (4)$$

где V - объем газа, прошедшего по капилляру за время t ; S - площадь сечения капилляра ($S = \pi r^2$).

Ламинарному потоку газа соответствует значение числа

Рейнольдса R_e , не превышающие 10^3 , а турбулентному - выше 10^3 .

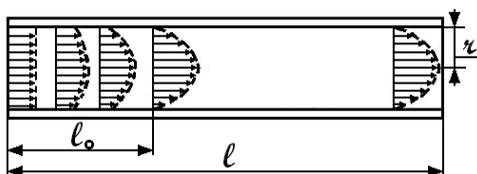


Рис. 1. Схема течения газа по трубке.

l - длина трубки; l_0 - длина части

трубки, где устанавливается параболическое распределение скоростей слоев; r - радиус трубки.

При втекании газа в трубку из большого резервуара скорости слоев сначала одинаковы по всему сечению (рис.1). По мере продвижения газа по трубке картина

распределения скоростей меняется, так как сила трения о стенки тормозит прилегающие к ним слои.

Характерное для ламинарного течения параболическое распределение скоростей устанавливается на некотором расстоянии ℓ_o от входа в трубку. Величина ℓ_o зависит от радиуса r трубки и числа Рейнольдса R_e согласно соотношению

$$\ell_o \approx 0,2 \cdot r \cdot R_e. \quad (5)$$

Из соотношения (5) следует, что для того, чтобы снизить величину ℓ_o , необходимо использовать капиллярные трубки малого радиуса и пропускать газ по ним с небольшими скоростями.

Наличие внутреннего трения в движущемся газе приводит к тому, что для протекания его по трубке требуется перепад давления по ее длине, то есть разность давлений на концах трубки. При ламинарном течении объем газа, протекающего за время t по трубке, определяется формулой Пуазейля

$$V = \frac{\pi r^4 \Delta p}{8 \eta \ell} t, \quad (6)$$

где ℓ – длина трубки; Δp - разность давлений на концах трубки. Формула (6) позволяет определить вязкость газа

$$\eta = \frac{\pi r^4 \Delta p}{8 V \ell} t. \quad (7)$$

При этом необходимо, чтобы с достаточным запасом выполнялось неравенство $R_e < 1000$, а так же, чтобы при течении газа по трубке не происходило существенного изменения удельного объема газа, так как при выводе формулы (6) удельный объем принимают постоянным. Это условие выполняется достаточно точно, если перепад давлений Δp на концах трубки будет не больше 1% от атмосферного, т.е. менее 10 см. вод. ст. Длина ℓ и радиус r трубки должны быть такими, чтобы число Рейнольдса было существенно меньше 10^3 и величина ℓ_o была мала по сравнению с длиной капилляра,

т.к. на участке ℓ_o градиент давления выше, чем на участке $\ell - \ell_o$, где течение газа установилось.

Используя связь между вязкостью η и средней длиной свободного пробега $\bar{\lambda}$ молекул газа можно вывести формулу

$$\eta = \frac{1}{3} \rho \bar{v} \bar{\lambda}, \quad (8)$$

где \bar{v} – средняя арифметическая скорость теплового движения молекул газа.

Определив значение плотности ρ газа из уравнения Менделеева – Клапейрона

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{p \mu}{RT}, \quad (9)$$

где p – давление газа; μ - его молярная масса; R - универсальная газовая постоянная; T - температура газа, а так же величину \bar{v} по формуле

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi \mu}}, \quad (10)$$

нетрудно найти величину $\bar{\lambda}$.

Конечную формулу для расчета средней длины свободного пробега молекул воздуха $\bar{\lambda}$ студентам предлагается получить самостоятельно.

Описание установки

Установка для определения коэффициента внутреннего трения воздуха изображена на рис. 2. Когда из сосуда (2) выливается вода, давление в нем понижается и через капиллярную трубку (1) проходит воздух. Разность давлений на концах капилляра (1) измеряют манометром (4). Сосуд (5) служит для сбора жидкости.

Перед измерением, необходимо вынуть верхнюю пробку сосуда (2) и наполнить сосуд водой. Затем открывают кран (3) и, следя за показаниями манометра (4), ждут установления стационарного течения газа через капилляр (1). Когда показания

манометра (4) станут постоянными, включают секундомер. После того как из сосуда (2) вытечет некоторый объем воды, определяемый мензуркой (5), выключают секундомер. Все полученные результаты затем используют для расчетов искомых величин η и $\bar{\lambda}$.

Измерения и обработка результатов

Задание 1. Изучить устройство и принцип действия установки.

Подготовьте установку к работе (наполните сосуд (2) водой), занесите в таблицу значения параметров l и r капилляра (1), по формуле (5) оцените величину l_0 для числа Рейнольдса $Re = 100$ при данной величине γ .

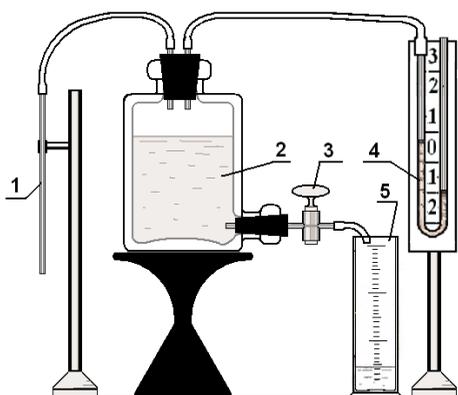


Рис. 2. Схема установки для определения η воздуха.

- 1 - капиллярная трубка; 2 - сосуд с жидкостью; 3 - краник; 4 - манометр;
5 - стакан для сбора воды.

Задание 2. Определить вязкость воздуха при комнатной температуре T .

Для этого измерьте величины Δp , V и t не менее трех раз. Проведите расчеты величины η для каждого случая. Результаты вносите в таблицу.

Задание 3. Вывести конечную формулу для расчета средней длины $\bar{\lambda}$ свободного пробега молекул воздуха.

Пользуясь, полученной формулой, найдите величину $\bar{\lambda}$ для трех случаев.

Результаты измерений и расчетов необходимо занести в таблицу 1 и найти средние значения искомых величин.

Определите погрешности.

Таблица 1. Результаты определения вязкости воздуха и средней длины свободного пробега его молекул

$\ell =$ _____ м		Комнатная температура				
T= _____ К						
$r =$ _____ м		Атмосферное давление				
p= _____ Па						
№ измерений	Δp		V, м ³	T, с	η , Па.с	$\bar{\lambda}$, м
	мм.вод.ст	Па				
1						
2						
3						
Средние значения:						

Сделайте вывод, подготовьте отчет.

Контрольные вопросы

1. Чем отличается ламинарное течение от турбулентного?
2. При каких условиях справедлива формула Пуазейля?
3. Объясните, как влияют параметры ℓ и r трубки (1) на результаты определения величин η и $\bar{\lambda}$.
4. Известно, что воздух состоит из смеси газов. Что следует понимать под $\bar{\lambda}$ молекул газа?

5. Физический смысл коэффициента внутреннего трения газа.
6. Зависимость коэффициента внутреннего трения газов от температуры.

Литература

1. Кикоин, А. К. Молекулярная физика : учебное пособие для студентов вузов / Кикоин, А. К., Кикоин, И. К. – Москва : Наука, 1976. – гл. 7 – Текст : непосредственный.
2. Макаренко, Г. М. Физика. - Минск : Дизайн ПРО, 1997. – Т. 1 Механика. Основы молекулярной физики и термодинамики. - 176 с., гл. 11. – С. 133 – 134. - Текст : непосредственный.
3. Детлаф, А. А. Курс физики : учебное пособие для студентов вузов / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский. – Москва : Академия, 2005. – 720 с., гл. 10. - С. 136 – 139. – Текст : непосредственный.
4. Зисман, Г. А. Курс общей физики : учебное пособие : [в 3-х томах] / Г. А. Зисман, О. М. Тодес. – Санкт-Петербург : Лань, 2011. - Т. 1. Механика. Молекулярная физика. Колебания и волны. – 352 с., гл. 6. – С. 93 – 97. – Текст : непосредственный.
5. Савельев, И. В. Курс общей физики: учебное пособие для студентов вузов : [в 3-х томах]. – Санкт – Петербург : Лань, 2005. – Т.1. Механика. Молекулярная физика 432 с., гл. 16. – С. 400 - 408. – Текст : непосредственный.
5. Трофимова, Т. И. Физика в таблицах и формулах. – Москва : Дрофа, 2002. – 432 с., гл. 2.3.13 - 2.3.14. – С.122. – Текст : непосредственный.
6. 1. Грабовский, Р. И. Курс физики : учебное пособие - Санкт – Петербург : Лань, 2009. - 608 с., гл. 7. - С. 115 -123. - Текст : непосредственный.

Работа № 12. ФАЗОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛАЖНОСТИ ВОЗДУХА

Цель работы: ознакомиться с методами определения влажности воздуха при помощи гигрометра и психрометра. Определить влажность воздуха в лаборатории.

Приборы и принадлежности: гигрометр Ламбрехта, гигрометр волосяной типа М-19, психрометр Асмана, термометр, легко испаряющаяся жидкость (этиловый спирт), пипетка, барометр.

Краткие теоретические сведения

В термодинамике вещества - газы, жидкости твердые тела называются фазами. Переход вещества из одной фазы в другую именуется фазовым переходом. Различают фазовые переходы первого и второго рода. Для фазовых переходов первого рода характерно поглощение или выделение теплоты, которая называется теплотой фазового перехода. При этом температура T системы остается постоянной, а энтропия S её и объем V изменяются. К фазовым переходам первого рода относятся все процессы перехода из одного агрегатного состояния в другое (плавление, парообразование и др.)

Фазовые переходы второго рода не связаны с поглощением теплоты и изменением объема. Такие переходы характеризуются постоянством объема ($V = \text{const}$) и энтропии ($S = \text{const}$), но скачкообразным изменением теплоемкости C . Примером фазового превращения второго рода является переход некоторых металлов и сплавов при низкой температуре близкой к абсолютному нулю в сверхпроводящее состояние, при котором электрическое сопротивление скачком падает до нуля. К фазовым переходам второго рода относятся также - превращение обыкновенного жидкого гелия He I в его жидкую модификацию He II , обладающую свойством сверхтекучести; переход железа при низкой температуре из ферромагнитного в парамагнитное состояние и др.

Установлено, что при переходе вещества из упорядоченного состояния в менее упорядоченное, например, из твердого состояния в жидкое; или из жидкого в газообразное, энтропия системы возрастает, т.е. $S_{\text{ж}} > S_{\text{тв.т.}}$; $S_{\text{пара}} > S_{\text{ж}}$. В процессе фазового перехода первого рода сохраняется равновесное двухфазное состояние вещества, которое характеризуется определенной точкой (температурой) фазового перехода (T_0). Например, твердое тело плавится при температуре плавления $T_{\text{пл}}$, которая остается неизменной, пока всё количество вещество

не расплавится; жидкость закипает при температуре $T_0 = T_{\text{кип}}$, и эта температура не изменяется пока данная жидкость целиком не перейдет в парообразное состояние.

На рис. 1 приведен график изменения температуры вещества по мере подведения к нему теплоты. При температурах $T < T_0$ и $T > T_0$ вещество находится в однофазном состоянии (соответственно, в жидком и парообразном). При $T = T_0$ существует одновременно две фазы: «жидкость - пар», а точка перехода (точка кипения) $T_{\text{кип}} = \text{const}$. Например, при $t < 100^\circ \text{C}$ вода – это жидкость; при $t > 100^\circ \text{C}$ – пар.

Следует отметить, что при изменении давления меняется и точка фазового перехода. Так с понижением давления, температура кипения воды уменьшается.

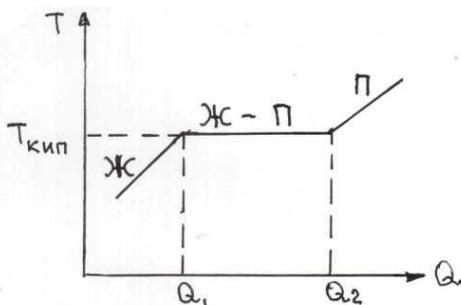


Рис.1. Изменение температуры вещества при нагревании.
Ж – жидкость; П - пар.

Процесс перехода вещества из конденсированной фазы (жидкой или твердой) в газ называется парообразованием. Парообразование с открытой поверхности жидкости при любой температуре и давлении называется испарением. При испарении температура жидкости понижается, так как с поверхности жидкости вылетают наиболее «быстрые» молекулы. В результате суммарная кинетическая энергия молекул жидкости уменьшается, что приводит к её охлаждению.

Одновременно с процессом испарения происходит процесс конденсации: часть молекул возвращается в жидкость. При равновесном процессе число молекул, вылетевших и возвратившихся назад в жидкость одинаково ($N_{\text{выл}} = N_{\text{возвр}}$).

Если число молекул $N_{\text{выл}} > N_{\text{возвр}}$, то преобладает испарение жидкости.

Скорость испарения зависит от рода жидкости, от её температуры и окружающей среды. При испарении жидкости при температуре T энтропия возрастает на величину $\Delta S = Q_{\text{исп}} / T$ ($Q_{\text{исп}}$ - количество теплоты, необходимое для испарения данной жидкости).

Круговорот воды в природе создает постоянное взаимодействие воды и воздуха, связанное с непрерывно протекающими процессами: испарением воды и конденсацией ее паров. В результате над поверхностью воды в воздухе создается определенная **влажность** воздуха.

Влажность воздуха имеет большое значение во многих технологических процессах, при хранении произведений искусств, книг и т.д. Количество водяного пара в воздухе может значительно меняться. Наибольшее количество пара над поверхностью океана образуется в жаркую погоду. При сильных холодах содержание водяных паров в воздухе понижается.

Различают пары насыщенные и ненасыщенные. Насыщенным является такой пар, который находится в равновесии с водой, когда число молекул вылетающих с поверхности жидкости в единицу времени равно числу молекул пара, возвращающихся в жидкость.

Ненасыщенный пар по своей природе не отличается от обычного газа, поэтому для него справедливо уравнение Менделеева- Клапейрона

$$p_n V = \frac{m}{\mu} RT, \quad (1)$$

где p_n – парциальное давление пара; μ - мольная масса воды; m - масса воды, содержащаяся в воздухе.

Поскольку

$$\frac{m}{V} = \rho_n, \quad (2)$$

где ρ_n - парциальная плотность пара, то уравнение (1) принимает вид

$$p_n = \rho_n \times \frac{RT}{\mu}. \quad (3)$$

Плотность и давление (упругость) ненасыщенного пара меньше чем плотность и давление насыщенного пара при данной температуре.

Различают абсолютную и относительную влажность. Абсолютной влажностью e называют массу водяного пара, содержащуюся в одном кубическом метре воздуха при данной температуре, т.е.

$$e = \frac{m}{V} = \rho_n. \quad (4)$$

Если процесс испарения воды в воздухе нарастает, то величина e увеличивается. При этом усиливается также и процесс конденсации. В результате может наступить такое состояние, при котором процессы испарения и конденсации уравниваются друг с другом и возрастание e прекратится. Это соответствует состоянию насыщения, а абсолютная влажность в этом случае e_{\max} называется максимальной влажностью E

$$E = e_{\max} = \rho_n, \quad (5)$$

где ρ_n - плотность насыщенного пара.

С учетом уравнения (3), выражение (4) для парциальной плотности ненасыщенного пара принимает вид

$$e = \rho_n = \frac{\mu}{RT} \times p_n \quad (6)$$

и для насыщенного пара

$$E = \rho_n = \frac{\mu}{RT} \times p_n, \quad (7)$$

где p_n - давление (упругость) насыщенного пара.

Степень насыщенности воздуха водяным паром r при данной температуре определяется отношением

$$r = \frac{e}{E} = \frac{\rho_n}{\rho_n} = \frac{p_n}{p_n}, \quad (8)$$

представляет собой **относительную влажность** воздуха. Для насыщенного пара $r = 100\%$.

Когда пар, содержащийся в воздухе, не является насыщенным, относительная влажность $r < 100\%$. Ощущение сухости или влажности воздуха связано с относительной влажностью.

Разность между максимальной влажностью E и абсолютной влажностью e называют дефицитом D влажности

$$D = E - e. \quad (9)$$

Увеличение интенсивности испарения за счет нагревания среды вода – воздух до более высокой температуры T_2 приводит к тому, что состояние насыщения наступит при большем значении E , чем в случае температуры T_1 . Таким образом, максимальная влажность увеличивается с температурой воздуха. Если же температуру воздуха, имеющего абсолютную влажность e , понижать, то величина E будет уменьшаться и при некоторой температуре T_p (точка росы) станет равной e , т.е.

$$E = e. \quad (10)$$

При температуре $T = T_p$ пар, содержащийся в воздухе, становится насыщенным. Однако использование для характеристики влажности воздуха лишь одной абсолютной влажности недостаточно, так как при одной и той же влажности воздух может быть сухим или влажным в зависимости от температуры. Поэтому для оценки степени сухости воздуха применяют ещё величину – относительную влажность.

Относительную влажность воздуха r можно определить, найдя отношение упругости p пара, содержащегося в воздухе, к упругости насыщенного пара p_n при данной температуре; это отношение обычно выражается в %

$$r = \frac{p}{p_n} \times 100\%. \quad (11)$$

Для насыщенного паром воздуха $p = p_n$ и $r = 100\%$. При полностью сухом воздухе $p = 0$ и $r = 0\%$.

С повышением температуры относительная влажность γ воздуха уменьшается.

В данной работе относительную влажность воздуха находят психрометрическим методом с помощью приборов – психрометров. Этот метод основан на использовании зависимости между скоростью испарения воды с её поверхности и влажностью окружающего воздуха. Воду заставляют испаряться с поверхности резервуара термометра. Для этого его обертывают кусочком ткани (батист), смоченной водой. А, чтобы обеспечить постоянный режим испарения в некоторых приборах применяют струю воздуха, направленную на термометр, которую получают при помощи небольшого вентилятора, смонтированного на психрометре. Испарение воды вызывает охлаждение термометра, и его температура постепенно понижается, пока не наступит тепловое равновесие, при котором дальнейшее охлаждение термометра прекращается и его температура становится постоянной, несмотря на продолжающееся испарение воды. Очевидно, что при тепловом равновесии количества теплоты Q_1 , которое термометр теряет в единицу времени вследствие испарения, равно тому количеству теплоты Q_2 , которое он получает в течение того же времени от окружающих тел $Q_1 = Q_2$.

Психрометр состоит из двух термометров. Резервуар с ртутью одного из термометров обернут батистом, этот термометр называется мокрым. Он показывает температуру влажной ткани. Другой термометр (его называют сухим) измеряет температуру окружающей среды.

Описание приборов

Влажность воздуха измеряют с помощью гигрометров и психрометров. С помощью гигрометра Ламбрехта (рис. 2) измеряют точку росы и определяют относительную влажность воздуха в процентах. Гигрометр наполняют летучей жидкостью (спирт) (5). При помощи груши (3) через камеру (1) гигрометра продувают воздух. Быстрое испарение спирта вызывает охлаждение стенок камеры и конденсацию на ней пара,

находящегося в воздухе. В результате конденсации пара стенки камеры (1) гигрометра запотевают, так как пар становится насыщенным, и термометр (4) показывает температуру, равную точки росы T_p .

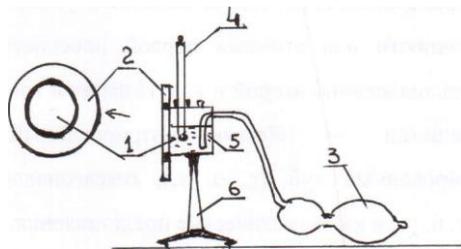


Рис. 2. Гигрометр Ламбрехта.

1 – камера; 2 – кольцо; 3 - груша; 4 – термометр;
5 – летучая жидкость (спирт); 6- подставка.

Зная точку росы T_p , по таблице (см. приложение 21) определяют величину $\rho_n = e$, что соответствует абсолютной влажности воздуха в лаборатории. Значение максимальной влажности E воздуха при данной комнатной температуре T находят по той же таблице (см. приложение 7) $\rho_n = E$.

Используя полученные величины, относительную влажность воздуха можно найти по формуле (8).

Относительную влажность воздуха можно также определить с помощью гигрометра типа М-19 (рис. 3)

Определение влажности воздуха с помощью гигрометра М-19 основано на свойстве обезжиренного волоса (1) менять свои размеры в зависимости от влажности воздуха. С помощью винта (2) осуществляется регулировка натяжения волоса, а изменение длины волоса в зависимости от влажности воздуха регистрируется по шкале (3) стрелкой (4), связанной с устройством (5). Шкала (3) прибора проградуирована в процентах относительной влажности r . С учетом уравнения (8) выражение (9) для дефицита влажности записывается в виде

$$D = E - e = \rho_n(1 - r). \quad (12)$$

Измерив с помощью гигрометра М-19 величину g воздуха в лаборатории, и найдя по таблице (см. Приложение 7) плотность насыщенного пара при данной температуре, рассчитывают дефицит D по формуле (12).

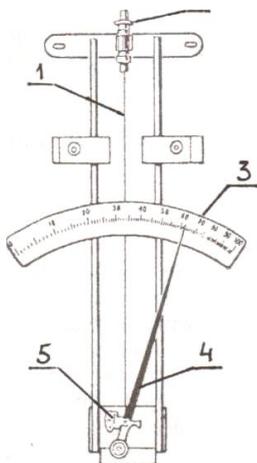


Рис. 3. Волосяной гигрометр М-19.

1 – обезжиренный волос; **2** - регулировочный винт; **3** – шкала прибора; **4** – стрелка прибора; **5** – механизм фиксации изменений длины волоса.

Для определения относительной влажности воздуха применяются психрометры. Принцип работы психрометра основан на изменении показаний сухим и смоченным водой термометрами. Разность показаний данных термометров зависит от влажности окружающего воздуха, так как интенсивность испарения воды зависит от степени насыщенности воздуха водяными парами. Зная величину температур сухого и смоченного термометров по «Психрометрической таблице» (см. Приложение 10) находят относительную влажность воздуха.

На рис. 4. показан психрометр Августа. Левый термометр (**1**) психрометра является сухим, а правый (**2**) – смоченный водой. По сухому термометру фиксируется температура T_c окружающего воздуха. Значение температуры смоченного

термометра $T_{см}$ вследствие испарения воды с полоски ткани (батист) (4) оказывается ниже показания сухого термометра $T_{см} < T_c$. Чем суше воздух, тем испарение протекает интенсивнее и тем больше разность показаний ΔT сухого и смоченного термометров

$$\Delta T = T_c - T_{см}. \quad (13)$$

Психрометрическая разность температур ΔT пропорциональна дефициту влажности D . Между ними существует зависимость вида

$$D = A p_{атм}(T_c - T_{см}), \quad (14)$$

где A - постоянная психрометра, определяемая опытным путем с учетом формул (9) и (14); $p_{атм}$ - атмосферное давление воздуха.

Кроме психрометра Августа часто употребляется другой прибор - психрометр Асмана (рис. 5.) В этом случае резервуары термометров помещены в металлические трубочки (3) и (5), через которые с помощью вентилятора (7), приводимого в движение электродвигателем (8), с постоянной скоростью

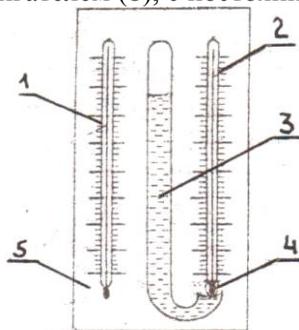


Рис. 4. Психрометр Августа.

1 - сухой термометр; 2 - смоченный термометр; 3 - питатель - сосуд с водой; 4 - батист; 5 - основание прибора.

прогоняется воздух. Резервуар правого термометра обертывают батистом (4) и смачивают водой при помощи пипетки. Равномерное протекание потока воздуха вокруг резервуаров термометров благоприятствует установлению равновесных условий для измерения температур сухим T_c и смоченным T_{cm} термометрами. Значение T_{cm} меньше T_c , т.к. термометр (6) охлаждается из-за испарения воды с поверхности батиста (4), облегающего его резервуар.

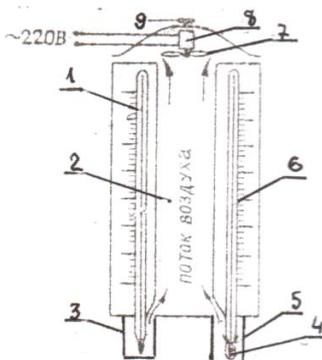


Рис. 5. Психрометр Асмана.

1 – сухой термометр; 2 – трубка центральная; 3, 5 – трубки съемные; 4 – батист; 6 – смоченный термометр; 7 – вентилятор; 8 – электродвигатель; 9 – кольцо подвеса прибора.

Измерения и обработка результатов

Задание 1. С помощью гигрометра определить относительную влажность r воздуха в лаборатории и его абсолютную влажность e . Учитывая приложение 9 вычислить дефицит влажности D , пользуясь формулой (12).

Результаты измерений и расчетов занесите в таблицу 1.

Задание 2. Определить относительную влажность воздуха с помощью психрометра Августа.

Питатель в виде стеклянной изогнутой трубки (3) (см. рис. 4) подведите к термометру с батистом и хорошо смочите ткань, после чего питатель опустите вниз так, чтобы он не касался термометра. Выждав 15-20 минут, пока показания термометра не перестанут меняться; зафиксируйте показания «сухого» и «влажного» термометров. Данные занесите в таблицу 2 .

Задание 3. Определить относительную влажность воздуха с помощью психрометра Асмана.

Смочите ткань водой на «влажном» термометре с помощью пипетки или небольшой пробирки. Включите вентилятор (7) (см. рис.5) и подождите, пока показания термометров станут постоянными. В течение этого времени вентилятор должен непрерывно работать.

После того, как показания влажного термометра перестанут меняться, произведите отсчет температур по обоим термометрам. Данные занесите в таблицу 2.

Задание 4. Измерить атмосферное давление $P_{атм}$ с помощью барометра, имеющегося в лаборатории.

Найдите постоянную А психрометра Асмана, исходя из соотношений (9) и (14).

Таблица 1. Результаты измерений влажности воздуха в лаборатории с помощью гигрометров.

№ n/n	T_p, K	$E \times 10^3, кг/м^3$	$E \times 10^3, кг/м^3$	$r, \%$	$D, кг/м^3$
1					
2					
3					

Таблица 2. Результаты измерений влажности воздуха с помощью психрометров.

№ п/п	Атм. давл., мм.рт.ст.	Психрометр Августа					Психрометр Асмана			
		T_c	T_{cm}	$T_c - T_{cm}$	$p_{атм},$ Па	Отн. влажн., г, %	T_c	T_{cm}	$T_c - T_{cm}$	Отн. влажн. г, %
1										
2										
3										

Сделайте вывод, подготовьте отчет.

Контрольные вопросы

1. Что называется абсолютной и относительной влажностью?
2. Что такое упругость насыщенных паров?
3. Почему недостаточно пользоваться понятием абсолютной влажности и необходимо знание относительной влажности?
4. На каком явлении основан психрометрический метод определения относительной влажности?
5. Что представляет собой точка росы?
6. Что называется дефицитом влажности?
7. Как изменяется относительная влажность воздуха с повышением и понижением его температуры?

Литература

1. Макаренко, Г. М. Физика. - Минск : Дизайн ПРО, 1997. – Т. 1 Механика. Основы молекулярной физики и термодинамики. - 176 с., гл. 12. – Текст : непосредственный.
2. Детлаф, А. А. Курс физики : учебное пособие для студентов вузов / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский. – Москва : Академия, 2005. – 720 с., гл. 12. - С. 169 – 178. – Текст : непосредственный.
4. Зисман, Г. А. Курс общей физики : учебное пособие : [в 3-х томах] / Г. А. Зисман, О. М. Годес. – Санкт-Петербург : Лань, 2011. - Т. 1. Механика. Молекулярная физика. Колебания и волны. – 352 с., гл. 10. – С. 187 – 210. – Текст : непосредственный.

5. Савельев, И. В. Курс общей физики: учебное пособие для студентов вузов : [в 3-х томах]. – Санкт – Петербург : Лань, 2005. – Т.1. Механика. Молекулярная физика 432 с., гл. 15. – С. 383 - 400. – Текст : непосредственный.

5. Трофимова, Т. И. Физика в таблицах и формулах. – Москва : Дрофа, 2002. – 432 с., гл. 2.3.13 - 2.3.14. – С.122. – Текст : непосредственный.

6. Грабовский, Р. И. Курс физики : учебное пособие - Санкт – Петербург : Лань, 2009. - 608 с., гл. 10. - С. 203 - 222. - Текст : непосредственный.

Литература

1. Браже, Р. А. Лекции по физике : учебное пособие. – Санкт-Петербург : Лань, 2013. – 320 с. – Текст : непосредственный.
2. Валишев, М. Г. Курс общей физики : учебное пособие / М. Г. Валишев, А. А. Повзнер. – Санкт-Петербург : Лань, 2011. – 576 с. – Текст : непосредственный.
1. Грабовский, Р. И. Курс физики : учебное пособие - Санкт – Петербург : Лань, 2009. - 608 с., Гл. 7. - С. 115 -123. - Текст : непосредственный.
3. Гринкруг, М. С. Лабораторный практикум по физике : учебное пособие / М. С. Гринкруг, А. А. Вакулук. – Санкт-Петербург : Лань, 2012 . – 480 с. – Текст : непосредственный.
4. Зисман, Г. А. Курс общей физики : учебное пособие : [в 3-х томах] / Г. А. Зисман, О. М. Тодес. – Санкт-Петербург : Лань, 2011. - Т. 1. Механика. Молекулярная физика. Колебания и волны. – 352 с. – Текст : непосредственный.
5. Ивлиев, А. Д. Физика : учебное пособие. – Санкт-Петербург : Лань, 2009. – 672 с. – Текст : непосредственный.
6. Кудин, Л. С. Курс общей физики в вопросах и задачах : учебное пособие / Л. С. Кудин, Г. Г. Бурдуковская. – Санкт-Петербург : Лань, 2013. – 320 с. – Текст : непосредственный.
7. Кикоин, А. К. Молекулярная физика : учебное пособие для студентов вузов / Кикоин, А. К., Кикоин, И. К. – Москва : Наука, 1976. – гл. 7 – Текст : непосредственный.
8. Курс физики : учебник для вузов : [в 2 томах] / под редакцией В. Н. Лозовского. – Санкт-Петербург : Лань, 2006. - Т. 1. – 576 с. – Текст : непосредственный.
9. Детлаф, А. А. Курс физики : учебное пособие для студентов вузов / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский. – Москва : Академия, 2005. – 720 с. – Текст : непосредственный.
10. Лабораторный практикум по электромагнетизму : пособие для студентов / Ю. А. Хворов, Т. Н. Астафьева. – Кызыл : Издательство Тывинского государственного университета, 2003. – 132 с. – Текст : непосредственный.
11. Платунов, Е. С. Физика. Словарь – справочник / Е. С. Платунов, В. А. Самолетов, С. Е. Буравой. – Санкт-Петербург : Питер, 2005. – 496 с. – Текст : непосредственный.

12. Савельев, И. В. Курс общей физики : учебное пособие : [в 3-х томах]. – Москва : Лань, 2005. - Т.1. Механика. Молекулярная физика. – 432 с. – Текст : непосредственный.

13. Справочник для студентов : высшая математика. Физика. Теоретическая механика. Сопротивление материалов /А. Д. Полянин, В. Д. Полянин, В. А. Попов и др. – Москва : Астрель, 2000. – 480 с. – Текст : непосредственный.

14. Трофимова, Т. И. Курс физики : учебное пособие для вузов. – Москва : Академия, 2007. – 560 с. – Текст : непосредственный.

15. Трофимова, Т. И. Физика в таблицах и формулах. – Москва : Дрофа, 2002. – 432 с. – Текст : непосредственный.

16. Фриш, С. Э. Курс общей физики : учебник : [в 3-х томах] / С. Э. Фриш, А. В. Тиморева. – Санкт-Петербург : Лань, 2009. – Т. 2. Электрические и электромагнитные явления. - 528 с. – Текст : непосредственный.

17. Яворский, Б. М. Справочное руководство по физике для поступающих в вузы и для самообразования / Б. М. Яворский, Ю. А. Селезнев. – Москва : Наука, 1989. – 576 с. – Текст : непосредственный.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1. *Некоторые физические постоянные*

Постоянная	Обозначение	Значение
Гравитационная постоянная	G	$6,6720 \times 10^{-11} \text{ Н} \times \text{м}^2 / \text{кг}^2$
Скорость света в вакууме	c	299792458 м/с
Магнитная постоянная	μ_0	$12,566370614 \times 10^{-7} \text{ Гн/м}$
Электрическая постоянная	ϵ_0	$8,85418782 \times 10^{-12} \text{ Ф/м}$
Постоянная Планка	h $h=h/2\pi$	$6,626176 \times 10^{-34} \text{ Дж} \times \text{с}$ $1,054887 \times 10^{-34} \text{ Дж} \times \text{с}$
Масса покоя электрона	m_e	$9,109534 \times 10^{-31} \text{ кг}$ $5,4858026 \times 10^{-4} \text{ а.е.м.}$
Масса покоя протона	m_p	$1,6726485 \times 10^{-27} \text{ кг}$ $1,007276470 \text{ а.е.м.}$
Масса покоя нейтрона	m_n	$1,6749543 \times 10^{-27} \text{ кг}$ $1,008665012 \text{ а.е.м.}$
Заряд электрона	e	$1,6021892 \times 10^{-19} \text{ Кл}$
Атомная единица массы		$1,6605655(86) \times 10^{-27} \text{ кг}$
Постоянная Авогадро	N_A	$6,022045 \times 10^{23}$ моль ⁻¹
Постоянная Фарадея	F	$96484,56 \text{ Кл} \times \text{моль}^{-1}$
Мольная газовая постоянная	R	$8,31441 \text{ Дж}/(\text{моль} \text{ К})$
Постоянная Больцмана	k	$1,38062 \times 10^{-23} \text{ Дж/К}$
Нормальный (мольный) объем идеального газа при нормальных условиях ($t=0^0\text{C}$, $p=101,325 \text{ кПа}$)	V_0	$2,241 \times 10^{-2} \text{ м}^3 \times \text{моль}^{-1}$
Нормальное атмосферное давление	$p_{\text{атм}}$	101325 Па
Ускорение свободного падения (нормальное)	g_n	$9,80665 \text{ м/с}^2$
Энергия покоя электрона	$m_e c^2$	0,51110034 МэВ
Энергия покоя протона	$m_p c^2$	938,2796 МэВ
Энергия покоя	$m_n c^2$	939,5731 МэВ

нейтрона		
Электрон-вольт		$1,6021 \times 10^{-19}$ Дж
Удельный заряд электрона	e/m	$1,76 \times 10^{11}$ Кл/кг
Масса атома водорода ^1H		1,07825036 а.е.м.
Масса атома дейтерия ^2H		2,014101795 а.е.м.
Масса атома гелия-4 ^4H		4,002603267 а.е.м.
Радиус первой боровской орбиты	a_0	$5,2917706 \times 10^{-11}$ м

Приложение 2 *Астрономические величины*

Космическое тело	Масса, кг	Средний радиус, м	Средний радиус орбиты, м
Солнце	$1,998 \times 10^{30}$	$6,96 \times 10^6$	-
Земля	$5,98 \times 10^{24}$	$6,37 \times 10^6$	$1,5 \times 10^{11}$
Луна	$7,35 \times 10^{22}$	$1,74 \times 10^6$	$3,84 \times 10^8$

Приложение 3 *Дополнительные единицы СИ*

Величина	Единица	
	Наименование	Обозначение
Плоский угол	радиан	рад
Телесный угол	стерадиан	ср

Приложение 4 *Внесистемные единицы*

Длина	1 А° (ангстрем) = 10^{-10} м 1 а.е. (астрономическая единица) $\approx 1,5 \times 10^{11}$ м 1 св.год (световой год) = $0,95 \times 10^{16}$ м 1 пк (парсек) = $3,1 \times 10^{15}$ м
Время	1 сут (сутки) = 86400 с 1 г (год) $3,11 \times 10^7$ с
Масса	1 а.е.м. (атомарная единица массы) $1,66 \times 10^{-27}$ кг 1 т (тонна) = 10^3 кг
Сила	1 кгс (килограмм×сила) = 9,81 Н
Давление	1 бар = 10^5 Па (точно) 1 атм = $1,013 \times 10^5$ Па 1 мм.рт.ст. (торр) = 133 Па
Энергия	1 эВ = $1,60 \times 10^{-19}$ Дж

	$1 \text{ Вт} \times \text{ч} = 3,6 \times 10^3 \text{ Дж}$
Мощность	1 л.с. (лошадиная сила) = 736 Вт

Приложение 5 Основные единицы СИ

Величина	Единица	
	Наименование	Обозначение
Длина	метр	м
Масса	килограмм	кг
Время	секунда	с
Сила электрического тока	ампер	А
Термодинамическая температура	кельвин	К
Количество вещества	моль	моль
Сила света	кандела	кд

Приложение 6 Внесистемные, допустимые к применению наравне с единицами СИ в разных областях

Наименование величины	Единица		Соотношение с единицей СИ
	наименование	обозначение	
Масса	тонна	т	10^3 кг
Время	минута	мин	60 с
	час	ч	3600 с
	сутки	сут	86400 с
Плоский угол	градус ⁰	$\pi/180 \text{ рад} =$
	минута'	$1,745329 \times 10^{-2} \text{ рад}$
	секунда"	$\pi/10800 \text{ рад} =$ $2,908882 \times 10^{-4} \text{ рад}$
Объем, вместимость	литр	л	$\pi/648000 \text{ рад} =$
			$4,848137 \times 10^{-6} \text{ рад}$
			10^{-3} м^3

Приложение 7 Производные единицы СИ, имеющие собственные наименования

Величина	Единица		Выражение производной единицы	
	наименование	обозначение	через другие единицы СИ	через основные единицы СИ
Частота	Герц	Гц	-	c^{-1}
Сила	Ньютон	Н	-	$м \times кг \times c^{-2}$
Давление	Паскаль	Па	$Н/м^2$	$м^{-1} \times кг \times c^{-2}$
Энергия, работа, количество теплоты	Джоуль	Дж	$Н \times м$	$м^2 \times кг \times c^{-2}$
Мощность, поток энергии	Ватт	Вт	Дж/с	$м^2 \times кг \times c^{-3}$
Количество электричества, электрический заряд	Кулон	Кл	-	$с \times А$
Электрическое напряжение, электрический потенциал	Вольт	В	Вт/А	$м^2 \times кг \times c^{-3} \times А^{-1}$
Электрическая ёмкость	Фарада	Ф	Кл/В	$м^{-2} \times кг^{-1} \times c^4 \times А^2$
Электрическое сопротивление	Ом	Ом	В/А	$м^2 \times кг \times c^{-3} \times А^{-2}$
Электрическая проводимость	Сименс	См	А/В	$м^{-2} \times кг^{-1} \times c^3 \times А^2$
Поток магнитной индукции	Вебер	Вб	$В \times с$	$м^2 \times кг \times c^2 \times А^{-1}$
Магнитная индукция	Тесла	Тл	$Вб/м^2$	$кг \times c^{-2} \times А^{-1}$

Индуктивность	Генри	Гн	Вб/А	$\text{м}^2 \times \text{кг} \times \text{с}^2 \times \text{А}^{-2}$
Световой поток	Люмен	лм	-	$\text{кд} \times \text{ср}$
Освещенность	Люкс	лк	-	$\text{м}^{-2} \times \text{кд} \times \text{ср}$
Активность нуклида	Беккерель	Бк	Вс	с^{-1}
Доза излучения	Грей	Гр	Гу	$\text{м}^2 \times \text{с}^{-2}$

Приложение 8 Соотношение между единицами длины

Единицы	м	см	мм	мкм	нм
Метр	1	10^2	10^3	10^6	10^9
Сантиметр	10^{-2}	1	10	10^4	10^7
Миллиметр	10^{-2}	10^{-1}	1	10^3	10^6
Микрометр	10^{-6}	10^{-4}	10^{-3}	1	10^3
Нанометр	10^{-9}	10^{-7}	10^{-6}	10^{-3}	1

Приложение 9 Соотношение между единицами массы

Единицы	кг	т	г	мг
Килограмм	1	10^{-3}	10^3	10^6
Тонна	10^3	1	10^6	10^9
Грамм	10^{-3}	10^{-6}	1	10^3
миллиграмм	10^{-6}	10^{-9}	10^{-3}	1

Приложение 10 Соотношение между единицами энергии

Единицы	Дж	кал	Вт×ч	эВ
Джоуль	1	0,239	$2,78 \times 10^{-4}$	$6,24 \times 10^{18}$
Калория	4,19	1	$1,16 \times 10^{-3}$	$2,61 \times 10^{19}$
Ватт×час	3600	860	1	$2,25 \times 10^{22}$
электрон-Вольт	$1,6 \times 10^{-19}$	$3,83 \times 10^{-20}$	$4,45 \times 10^{-23}$	1

Приложение 11 Соотношение между единицами площади

Единицы	м^2	см^2	га
квадратный метр	1	10^4	10^8
квадратный сантиметр	10^{-4}	1	10^{-8}
Гектар	10^4	10^8	1

Приложение 12 Соотношение между единицами плотности

Единицы	кг/м ³	т/м ³	кг/дм ³	г/см ³
килограмм на кубический метр	1	10 ⁻³	10 ⁻³	10 ⁻³
тонна на кубический метр	10 ³	1	1	1
килограмм на кубический дециметр	10 ⁸	1	1	1
грамм на кубический сантиметр	10 ³	1	1	1

Приложение 13 Соотношение между единицами времени

Единицы	с	сек	ч	мин	мс	мкс
Секунда	1	1/86400	1/3600	1/60	10 ³	10 ⁶
Сутки	86400	1	24	1440	86,4×10 ⁶	86,4×10 ⁹
Час	3600	1/24	1	60	3,6×10 ⁶	3,6×10 ⁹
Минута	60	1/1440	1/60	1	60000	60×10 ⁶
миллисекунда	10 ⁻³	1/86,4×10 ⁶	1/3,6×10 ⁶	1/60×10 ³	1	10 ³
микросекунда	10 ⁻⁶	1/86,4×10 ⁹	1/3,6×10 ⁹	1/60×10 ⁶	10 ⁻³	1

Приложение 14 Соотношение между единицами мощности

Единицы	Вт	ккал/с	л.с.
Ватт	1	0,239	1,36×10 ⁻³
калория в секунду	4,1868	1	5,69×10 ⁻³
лошадиная сила	736	175,5	1

Приложение 15 Соотношение между единицами количества теплоты

Единицы	Дж	ккал
Джоуль	1	0,238846
Калория	4,1868	1

Приложение 16 Соотношение между единицами объема теплоты

Единицы	м ³	см ³	л (дм ³)
кубический метр	1	10 ⁶	10 ³
кубический сантиметр	10 ⁻⁶	1	10 ⁻³
Литр (кубический дециметр)	10 ⁻³	10 ³	1

Приложение 17. Десятичные кратные и дольные приставки и множители

Наименование	Приставка		Множитель	Пример
	Обозначение			
	Русское	Международное		
экса-	Э	E	10 ¹⁸	1 Эм = 10 ¹⁸ м
пета-	П	P	10 ¹⁵	1 Пм = 10 ¹⁵ м
тера-	Т	T	10 ¹²	1 Тм = 10 ¹² м
гига-	Г	G	10 ⁹	1 Гм = 10 ⁹ м
мега-	М	M	10 ⁶	1 Мм = 10 ⁶ м
кило-	к	k	10 ³	1 км = 10 ³ м
гекто-	г	h	10 ²	1 гм = 10 ² м
дека-	да	da	10 ¹	1 дам = 10 ¹ м
деци-	д	d	10 ⁻¹	1 дм = 10 ⁻¹ м
санти-	с	c	10 ⁻²	1 см = 10 ⁻² м
милли-	м	m	10 ⁻³	1 мм = 10 ⁻³ м
микро-	мк	μ	10 ⁻⁶	1 мкм = 10 ⁻⁶ м
нано-	н	n	10 ⁻⁹	1 нм = 10 ⁻⁹ м
пико-	п	p	10 ⁻¹²	1 пм = 10 ⁻¹² м
фемто-	ф	f	10 ⁻¹⁵	1 фм = 10 ⁻¹⁵ м
атто-	а	a	10 ⁻¹⁸	1 ам = 10 ⁻¹⁸ м

Приложение 18. Некоторые постоянные жидкостей

Вещество	$\rho, \text{кг} / \text{м}^3$	$c, 10^3 \text{ Дж} / (\text{кг} \times \text{К})$	$\sigma, 10^{-3} \text{ Н} / \text{м}$	$\eta, 10^{-3}, \text{ Пас}$	$\lambda, 10^3 \text{ Дж} / \text{кг}$
Вода H ₂ O	998,2	4,14	72,75 (Т = 293 К)	1,002 (Т = 293 К)	2259
Глицерин C ₃ H ₈ O ₃	1260	2,43	63,4 (Т = 293 К)	1495,0 (Т = 293 К)	-
Спирт этиловый C ₂ H ₆ O	798,3	2,51	22,75 (Т = 293 К)	1,200 (Т = 293 К)	855
Эфир этиловый C ₄ H ₁₀ O	414	2,34	16,96 (Т = 293 К)	0,242 (Т = 293 К)	355
Масло касторовое	970	-	33,1 (Т = 291 К)	986 (Т = 293 К)	-
Анилин		2,018	42,9	10,2	
Аммиак			59,3		
Ацетон		2,114	23,7	0,513	
Бром			28,9		
Бензол			72,75	0,91	
Воск расплавленный		2,93	95,1		101
Керосин		2,085	59,4	1,8 – 1,9	
Толуол			28,5		
Фреон -12		0,84	9,0		
Мыльный раствор			47,2		

Приложение 19. Плотность некоторых твердых тел

Вещество	$\rho, 10^3, \text{кг} / \text{м}^3$	Вещество	$\rho, 10^3, \text{кг} / \text{м}^3$
Бронза (Cu, Zn, Sn, Al)	8,7-8,9	Свинец	11,34
Дюралюминий (Al, Cu)	2,8	Цинк	6,96
Инвар (Fe, Ni, C)	8,0	Латунь	8,5
Константан	8,8	Ртуть (жидк.)	13,546

(Cu, Ni)			
Менганин (Cu, Mn, Ni)	8,5	Эбонит	1,15
Стали	7,5-7,9	Янтарь	1,1
Железо	7,87	Фарфор	2,3-2,5
Медь	8,93	Стекло обыкновенное	2,4-2,8
Олово (серое)	5,8	Плексиглас	1,16-1,20
Алмаз	3,515	Асфальт	1,1 – 2,8
Бетон	1,8 – 2,8	Бумага писчая	0,7 – 1,1
Воск	0,87 – 0,99	Гранит	2,5 – 3,0
Графит	2,265	Земля	1,3 – 2,0
Камфара	0,99	Капрон	1,14
Канифоль	1,07 – 1,1	Кварц	2,5 – 2,8
Кость	1,7 -2,0	Лава вулканическая	2 - 3
Лавсан	1,3 – 14	Лёд (0°С)	0,88 – 0,92
Кирпич обычный	1,4 – 1,6	Мел	1,8 – 2,6
Медный купорос	2,2 – 2,3	Полистирол	1,05 – 1,07
Полиэтилен	0,92 – 0,96	Пробка	0,22 – 0,26
Ртуть твердая	14,19	Сера	1,93 – 2,07
Соль поваренная	2,15 – 2,17	Стекло бутылочное	2,6
Стекло зеркальное	2,45 – 2,72	Стекло хрусталь	2,9 – 3,0
Сургуч	1,8	Сухой лёд	1,57
Чугун серый	6,6 – 7,2	Парафин	0,87 – 0,92
Нашатырь	1,5 – 1,6	Вольфрам	19,3

Приложение 20. Удельная теплоемкость различных твердых тел

Вещество	С	
	кДж/(кг × К)	Ккал/(кг × С°)
Асфальт	0,92	0,22
Бетон	0,88	0,21
Бумага	1,51	0,36
Воск	2,93	0,70
Гипс	0,84-0,92	0,20-0,22

Глина	0,84-1,05	0,20-0,25
Гранит (0-100 ⁰ С)	0,8	0,2
Дерево (0-100 ⁰ С)	2,39	0,57
Железобетон	0,8	0,2
Камень	0,88	0,21
Кирпич красный	0,84	0,20
Кирпич силикатный	0,41	0,098
Константан	0,39-0,41	0,093-0,098
Латунь	1,58	0,43
Мел	0,92	0,22
Мрамор	1,30	0,31
Нафталин	0,448	0,107
Нихром	2,89	0,69
Парафин	0,79	0,19
Песок (20-100 ⁰ С)	0,92	0,22
Полистирол	2,30	0,55
Полиэтилен	2,05	0,49
Пробка	2,09	0,50
Резина	0,88	0,21
Слюда	2,1	0,5
Снег	0,46	0,11
Сталь (20-200 ⁰ С)	0,50	0,12
Сталь (200-400 ⁰ С)	0,79	0,19
Стекло зеркальное (0-100 ⁰ С)	0,67	0,16
Стекло лабораторное (0-100 ⁰ С)	0,84	0,20
Текстолит	1,47	0,35
Торф	1,88	0,45

Приложение 21. Давление и плотность насыщенного водяного пара при различных температурах

Т, К	Р _н , Па	$\rho_n \times 10^3, \text{ кг/м}^3$	Т, К	Р _н , Па	$\rho_n \times 10^3, \text{ кг/м}^3$
263	259,9	2,14	285	1402,3	10,7
264	283,9	2,33	286	1519,6	11,4
265	337,2	2,54	287	1598,3	12,1
266	351,9	2,76	288	1704,9	12,8
267	367,9	2,99	289	1816,9	13,6
268	401,2	3,24	290	1936,8	14,5

269	437,2	3,51	291	2063,5	15,4
270	475,9	3,81	292	2196,8	16,3
271	517,2	4,13	293	2338,1	17,3
272	562,5	4,47	294	2486,0	18,3
273	610,5	4,84	295	2643,3	19,4
274	656,1	5,22	296	2808,6	20,6
275	703,6	5,60	297	2983,3	21,8
276	756,8	5,98	298	3167,2	23,0
277	812,1	6,40	299	3360,5	24,4
278	871,1	6,84	300	3567,1	25,8
279	934,4	7,3	301	3779,1	27,2
280	1001,1	7,8	302	4004,3	28,7
281	1073,1	8,3	303	4241,6	30,3
282	1147,7	8,8	304	4603,2	31,9
283	1227,7	9,4	305	4753,6	33,9
284	1300,7	10,0	306	5029,4	35,7

Приложение 22. Психрометрическая таблица

Показание сухого тер- мометра, Т, К	Разность показаний сухого и смоченного термометров, К										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Относительная влажность г, %										
273	100	81	63	45	28	11	-	-	-	-	-
275	100	84	68	51	35	20	-	-	-	-	-
277	100	85	70	56	42	28	14	-	-	-	-
279	100	86	73	60	47	35	23	10	-	-	-
281	100	87	75	63	51	40	28	18	7	-	-
283	100	88	76	65	54	44	34	24	14	4	-
285	100	89	78	68	57	48	38	29	20	11	-
287	100	90	79	70	60	51	42	33	25	17	9
289	100	90	81	71	62	54	45	37	30	22	15
291	100	91	82	73	64	56	48	41	34	26	20
293	100	91	83	74	66	59	51	44	37	30	24
295	100	92	83	76	68	61	54	47	40	34	28
297	100	92	84	77	69	62	56	49	43	37	31
299	100	92	85	78	71	64	58	50	45	40	34
301	100	93	85	78	72	65	59	53	48	42	37
303	100	93	86	79	73	67	61	55	50	44	39

**Приложение 23. Эффективный диаметр молекул,
динамическая вязкость и теплопроводность газов при
нормальных условиях**

Вещество	Эффективный диаметр d , нм	Динамическая вязкость η , мкПа \times с	Теплопроводность λ , мВт / (м \times К)
Азот	0,38	16,6	24,3
Аргон	0,35	21,5	16,2
Водород	0,28	8,66	168
Воздух	-	17,2	24,1
Гелий	0,22	-	-
Кислород	0,36	19,8	24,4
Пары воды	-	8,32	15,8

Приложение 24. Некоторые сведения из математики

Тригонометрические функции острого угла

$$\sin \alpha = \frac{a}{c}; \quad \cos \alpha = \frac{b}{c}; \quad \operatorname{tg} \alpha = \frac{a}{b}; \quad \operatorname{ctg} \alpha = \frac{b}{a}.$$

Теорема Пифагора $c^2 = a^2 + b^2$.

Теорема косинусов $a^2 = c^2 + b^2 - 2cb \cos \alpha$.

Теорема синусов $\frac{\sin \alpha}{a} = \frac{\sin \beta}{b} = \frac{\sin \gamma}{c}$..

Таблица связи между тригонометрическими функциями

Единицы	$\sin \alpha$	$\cos \alpha$	$\operatorname{tg} \alpha$	$\operatorname{ctg} \alpha$
Sin α	-	$\pm \sqrt{1 - \cos^2 \alpha}$	$\frac{\operatorname{tg} \alpha}{\pm \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha}}$	$\frac{1}{\pm \sqrt{1 + \operatorname{ctg}^2 \alpha}}$

Cosa	$\pm\sqrt{1-\sin^2\alpha}$	-	$\frac{1}{\pm\sqrt{1+\operatorname{tg}^2\alpha}}$	$\frac{\operatorname{ctg}\alpha}{\pm\sqrt{1+\operatorname{ctg}^2\alpha}}$
Tga	$\frac{\sin\alpha}{\pm\sqrt{1-\sin^2\alpha}}$	$\frac{\pm\sqrt{1-\cos^2\alpha}}{\cos\alpha}$	-	$\frac{1}{\operatorname{ctg}\alpha}$

Значение тригонометрических функций некоторых углов

α	0^0	30^0	45^0	60^0	90^0	120^0	180^0	270^0	360^0
sina	0	1/2	$\sqrt{2}/2$	$\sqrt{3}/2$	1	$\sqrt{3}/2$	0	-1	0
cosa	1	$\sqrt{3}/2$	$\sqrt{2}/2$	1/2	0	-1/2	-1	0	1
tga	0	1/√3	1	√3	∞	-√3	0	∞	0

Некоторые формулы алгебры и геометрии

Корни квадратного уравнения	$ax^2 + bx + c = 0; \rightarrow$ $x_{1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a};$ $x_{1,2} = \frac{-\frac{b}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{b}{2}\right)^2 - ac}}{a}.$ $x^2 + px + q = 0; \rightarrow$ $x_{1,2} = -\frac{p}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{p}{2}\right)^2 - q}.$
Правила действия с корнями	$a^x \times a^y = a^{(x+y)}; \frac{1}{a^x} = a^{-x};$ $\frac{a^x}{a^y} = a^{x-y}; a^x \times b^x = (ab)^x;$

	$(a^x)^y = a^{xy}; \quad \sqrt[n]{a^m} = a^{\frac{m}{n}} = (\sqrt[n]{a})^m;$ $\sqrt[n]{ab} = \sqrt[n]{a} \times \sqrt[n]{b}; \quad \sqrt[n]{\frac{a}{b}} = \frac{\sqrt[n]{a}}{\sqrt[n]{b}};$ $\frac{1}{\sqrt[n]{\frac{a}{b}}} = \sqrt[n]{\frac{b}{a}}.$
Тождества сокращенного умножения	$(a \pm b)^2 = a^2 \pm 2ab + b^2$ - квадрат двучлена; $(a \pm b)^3 = a^3 \pm 3a^2b + 3ab^2 \pm b^3$ - куб двучлена; $a^2 - b^2 = (a - b)(a + b)$ - разность квадратов; $a^3 - b^3 = (a - b)(a^2 + ab + b^2)$ - разность кубов; $a^3 + b^3 = (a + b)(a^2 - ab + b^2)$ - сумма кубов.
$\sin \alpha = \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{ctg}^2 \alpha}}$ $\cos \alpha = \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha}}$ $\sin 2\alpha = 2 \sin \alpha \cos \alpha$ $\cos 2\alpha = \cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha$ $\operatorname{tg} 2\alpha = \frac{2 \operatorname{tg} \alpha}{1 - \operatorname{tg}^2 \alpha}$ $\operatorname{ctg} 2\alpha = \frac{\operatorname{ctg}^2 \alpha - 1}{2 \operatorname{ctg} \alpha}$	$\sin \alpha + \sin \beta = 2 \sin \frac{\alpha + \beta}{2} \cos \frac{\alpha - \beta}{2}$ $\sin \alpha - \sin \beta = 2 \cos \frac{\alpha + \beta}{2} \sin \frac{\alpha - \beta}{2}$ $\cos \alpha + \cos \beta = 2 \cos \frac{\alpha + \beta}{2} \cos \frac{\alpha - \beta}{2}$ $\cos \alpha - \cos \beta = -2 \sin \frac{\alpha + \beta}{2} \sin \frac{\alpha - \beta}{2}$
$\sin^2 \frac{\alpha}{2} = \frac{1 - \cos \alpha}{2}$	$2 \sin \alpha \sin \beta = \cos(\alpha - \beta) - \cos(\alpha + \beta)$

$\cos^2 \frac{\alpha}{2} = \frac{1 + \cos \alpha}{2}$	$2 \cos \alpha \cos \beta = \cos(\alpha - \beta) + \cos(\alpha + \beta)$ $2 \sin \alpha \cos \beta = \sin(\alpha - \beta) + \sin(\alpha + \beta)$
---	--

Приложение 25. Латинский алфавит

Печатные буквы	Рукописные буквы	Название
Aa	Aa	А
Bb	Bb	Бе
Cc	Cc	Це
Dd	Dd	Де
Ee	Ee	Е
Ff	Ff	Эф
Gg	Gg	Гэ
Hh	Hh	Аш
Ii	Ii	И
Jj	Jj	Йот
Kk	Kk	КА
Ll	Ll	Эль
Mm	Mm	Эм
Nn	Nn	Эн
Oo	Oo	О
Pp	Pp	Пэ
Qq	Qq	Ку
Rr	Rr	Эр
Ss	Ss	Эс
Tt	Tt	Тэ
Uu	Uu	У
Vv	Vv	Вэ
Ww	Ww	Дубль-вэ
Xx	Xx	Икс
Yy	Yy	Игрек
Zz	Zz	Зет

Приложение 26. Греческий алфавит

Печатные буквы	Рукописные буквы	Название	Произношение
Αα	Αα	Альфа	А
Ββ	Ββ	Бета	Б
Γγ	Γγ	Гамма	Г
Δδ	Δδ	Дельта	Д
Εε	Εε	Эпсилон	Э
Ζζ	Ζζ	Дзета	Дз
Ηη	Ηη	Эта	Э
Θθ	Θθ	Тэта	Тх
Ιι	Ιι	Йота	И
Κκ	Κκ	Каппа	К
Λλ	Λλ	Ламбда	Л
Μμ	Μμ	Мю	М
Νν	Νν	Ню	Н
Ξξ	Ξξ	Ксю	Кс
Οο	Οο	Омикрон	О
Ππ	Ππ	Пи	П
Ρρ	Ρρ	Ро	Р
Σσ	Σσ	Сигма	С
Ττ	Ττ	Тау	Т
Υυ	Υυ	Ипсилон	Ю
Φφ	Φφ	Фи	Ф
Χχ	Χχ	Хи	Х
Ψψ	Ψψ	Пси	Пс
Ωω	Ωω	Омега	О

**Хворов Юрий Алексеевич
Астафьева Татьяна Николаевна
Юрченко Светлана Анатольевна**

**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО ФИЗИКЕ
(механика и молекулярная физика)**

2-е издание

Компьютерную графику выполнил
Калиниченко Сергей Александрович

Редактор А.Р. Норбу
Дизайн обложки К.К. Сарыглар

Сдано в набор: 22.10.2020. Подписано в печать: 24.11.2020.
Формат бумаги 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная.
Физ. печ. л. 7,8. Усл. печ. л. 7,2. Заказ № 1633. Тираж 50 экз.

667000, Республика Тыва, г. Кызыл, ул. Ленина, 36
Тувинский государственный университет
Издательство ТувГУ