

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ДАЛЬНЕВОСТОЧНЫЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ



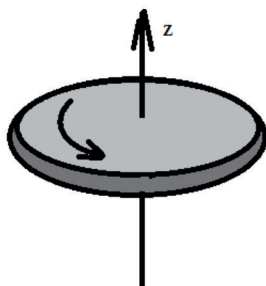
В.В. Сергеева, С.Ю. Чуйкова

МЕХАНИКА И МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

Учебное пособие

$$W = \frac{kx^2}{2}$$

$$\vec{p} = m\vec{v}_c$$



$$p = \frac{1}{3} n \cdot m_0 \langle v \rangle^2$$

$$pV = \nu RT$$

$$F(\nu) = 4\pi \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot e^{-\frac{mv^2}{2kT}} \cdot \nu^2$$

Благовещенск
Издательство ДальГАУ
2014

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ДАЛЬНЕВОСТОЧНЫЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

В.В. Сергеева, С.Ю. Чуйкова

МЕХАНИКА И МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

Учебное пособие

Рекомендовано
Дальневосточный региональным учебно-методическим центром
(ДВ РУМЦ) в качестве учебного пособия
для студентов направления подготовки бакалавров
110800.62 «Агроинженерия»,
140400.62 «Электроэнергетика и электротехника»,
260100.62 «Продукты питания из растительного сырья»,
260200.62 «Продукты питания животного происхождения»
(Протокол №5 от 15.10.2013 г.)

Благовещенск
Издательство ДальГАУ
2014

УДК 539.19(075.8)
ББК 22.3

Механика и молекулярная физика: учебное пособие / сост. В.В. Сергеева, С.Ю. Чуйкова. – Благовещенск: ДальГАУ, 2014.- 141 с.

Учебное пособие включает 13 лабораторных работ. Каждая работа содержит краткую теорию, порядок выполнения лабораторной работы, основные термины, индивидуальные задания и контрольные вопросы для подготовки к защите лабораторной работы. В пособии предложены варианты индивидуальных заданий по теории погрешностей, тестовые задания, задачи для самостоятельного решения с примерами, глоссарий, основные законы, определения и формулы, справочный материал в виде 11 таблиц, вопросы к зачёту и экзамену содержание и список литературы.

Теоретический материал изложен в доступной для усвоения форме, методика выполнения работ изложена последовательно, что позволяет студентам правильно выполнить лабораторный эксперимент.

Учебное пособие предназначено для студентов очной, заочной формы обучения по направлениям подготовки ФГОС ВПО: 110800.62 – Агроинженерия, 140400.62 – Электроэнергетика и электротехника, 260100.62 – Продукты питания из растительного сырья, 260200 – Продукты питания животного происхождения, 260800.62 – Технология продукции и организации общественного питания, 280100.62 – Природообустройство и водопользование и др.

Рецензенты:

А.Л. Бугримов,

д-р техн. наук, профессор, завкафедрой вычислительной математики и методики преподавания информатики ФМФ ГОУ ВПО «Московский государственный областной университет» (МГОУ)

И.А. Шпехт,

канд. техн. наук., доцент, доцент кафедры техногенной безопасности, математики и информатики филиала РГСУ в г. Анапа

Редактор А.И. Казимова

Учебное пособие по механике и молекулярной физике для студентов очной, заочной
формы обучения по направлениям подготовки ФГОС ВПО

Редактор А.И. Казимова
Лицензия ЛР 020427 от 25.04.1997 г.
Подписано к печати Формат 60х90/16
Уч.-изд.л. – 2,4.
Тираж 300 экз.

Отпечатано в отделе оперативной полиграфии издательства ДальГАУ
675005, г. Благовещенск, ул. Политехническая, 86

ПРЕДИСЛОВИЕ

Учебное пособие содержит описание лабораторных работ, составленных в соответствии с программой по физике для студентов, обучающихся по программам бакалавриата по разделам курса физики "Механика" и "Молекулярная физика". Цель - помочь студентам практически познакомиться с рядом физических явлений и закономерностей, освоить методику проведения эксперимента. Контрольные и тестовые задания помогут студентам самостоятельно подготовить теоретические вопросы и проверить знания по данным разделам.

В пособии перед каждой работой помещён достаточный теоретический материал, содержащий описание физического явления и выводы формул, необходимых для проведения эксперимента. Для проверки усвоения материала и умения осмыслить физическую задачу, введены контрольные вопросы. Пособие также содержит основные сведения о применении теории погрешностей и методику работы с измерительными приборами микрометром и штангенциркулем.

Все измерения и вычисления физических величин необходимо проводить в системе единиц СИ с использованием кратных и дольных приставок.

ВВЕДЕНИЕ

Измерения и погрешности измерений

Измерения

Одной из важнейших задач физического эксперимента являются измерения. *Измерением* какой-либо физической величины называется операция, в процессе которой устанавливается, во сколько раз измеряемая величина больше (или меньше) соответствующей величины, принятой за единицу физической величины. Например, при измерении некоторой массы

т мы устанавливаем, во сколько раз эта масса превосходит массу эталонного образца в один килограмм.

Измерения делятся на *прямые* и *косвенные*.

К *прямым* относятся измерения физических величин непосредственно физическими приборами (без применения расчётов по формулам, связывавшим различные физические величины).

Примеры: измерение длины линейкой, измерение времени при помощи часов или секундомера, измерение силы тока амперметром, частоты – частотомером, температуры – термометром и т. д.

К *косвенным* измерениям относятся измерения таких физических величин, для нахождения которых в данных условиях эксперимента необходимо использовать связь в виде формулы с другими, непосредственно измеряемыми величинами.

Примеры: нахождение объёма тела по его линейным размерам; определение плотности тела по измеренной массе и вычисленному объёму; расчёт сопротивления проводника по показаниям амперметра и вольтметра и т. д.

Результаты измерений физических величин всегда являются не абсолютно точными, а приближёнными, то есть в результате измерений всегда получают искомую величину с некоторой точностью. Точность измерения зависит от чувствительности прибора и восприимчивости органов чувств экспериментатора.

Классификация погрешностей

При измерении какой-либо физической величины экспериментатор получает результат измерения, который близок к истинному значению. Возникает вопрос: насколько близок результат измерения к истинному значению? Ответ на этот вопрос можно получить, введя *погрешности измерения* и установив правила оценки, то есть приближённого вычисления, этой погрешности. Погрешности результата измерения определяются

разностью измеренной и истинной величин и будут зависеть от многих причин. Погрешности измерений по характеру их проявления можно разделить на три категории.

Систематическая погрешность измерения - это такая погрешность, которая приводит к отклонению результатов отдельных измерений физической величины в одну сторону от её истинного значения (в сторону завышения или занижения). Систематические погрешности обычно либо остаются постоянными (положительными или отрицательными) на протяжении серии наблюдений (в случаях округления результата или смещения нуля прибора), либо изменяются по определённому закону (как в случаях неравномерности шкалы, неравномерности сечения капилляра термометра и т.д.). Систематические погрешности в принципе всегда могут быть исключены, хотя на практике этого не всегда легко добиться.

Случайная погрешность - это такая погрешность, которая изменяется при измерениях случайным образом, принимая значения как положительные, так и отрицательные. Случайные погрешности произвольно вносятся экспериментатором вследствие несовершенства органов чувств, появляются из-за ограниченности точности прибора и т.д.

Грубая погрешность (промах) - это погрешность, существенно превышающая предполагаемую погрешность в данных условиях измерения. Третья категория погрешности встречается весьма редко и её поведение связано либо с неисправностью приборов, либо с несовершенством методики эксперимента, либо с низкой квалификацией экспериментатора. Если такая погрешность установлена, то соответствующий результат исключается из дальнейшей обработки.

Случайные погрешности легко обнаружить при многократных измерениях. Результаты отдельных измерений почти никогда не совпадают и группируются всегда около истинного значения измеряемой величины. Многократные измерения собственно и проводятся (когда это возможно) как с целью выявления случайных погрешностей, так и для определения

характера их распределения. Последующая обработка серии результатов, как будет показано ниже, даёт возможность определить погрешность всего эксперимента в целом.

Измерение линейных размеров

В целом ряде лабораторных работ приходится производить измерение длины (ширины, высоты), поэтому рассмотрим вопрос о способах её измерения. Измерение длины с повышенной точностью производится с помощью приборов: штангенциркуля и микрометра. Для того чтобы измерить длину штангенциркулем, нужно уметь пользоваться нониусом. Нониусом называется дополнительная шкала (линейка с делениями) к основной шкале, позволяющая отсчитывать доли деления основной шкалы. Рассмотрим правила пользования нониусом.

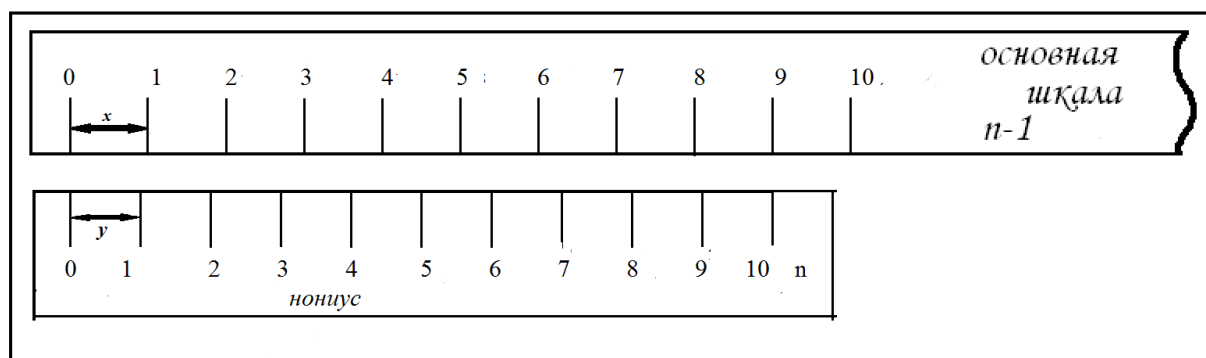


Рис. 3 а. Определение размеров с использованием шкалы нониуса

Нониус изготовлен так, чтобы общая длина n делений его (на рисунке $n=10$) была равна общей длине $(n-1)$ делений основной шкалы (на рисунке $n-1=9$). Если принять, что цена деления основной шкалы x , а нониуса y , то из рисунка 3а видно, что $x(n-1) = y \cdot n$. Откуда получим $(x-y)n = x$; $x - y$ называется точностью нониуса, $(x-y) = \frac{x}{n}$.

Точность нониуса бывает 0,1 мм; 0,05 мм, 0,02 мм.

В данном примере точность нониуса $n=0,1$ мм.

Определим длину тела с помощью нониуса точностью 0,1 мм.

$$x - y = \frac{1\text{мм}}{10} = 0,1 \text{ мм.}$$

Пусть ℓ – определяемая длина тела. Тело располагают так, чтобы один край его совпадал с «0» основной шкалы. Затем перемещают нониус вдоль основной шкалы до тех пор, пока «0» нониуса коснётся противоположного края предмета. Целое число делений (рис. 3б) отсчитываем от «0» основной шкалы. В данном случае $\ell = 3 \text{ мм} + \Delta\ell$. Определим $\Delta\ell$. В нашем примере первый штрих нониуса совпадает с четвёртым штрихом основной шкалы.

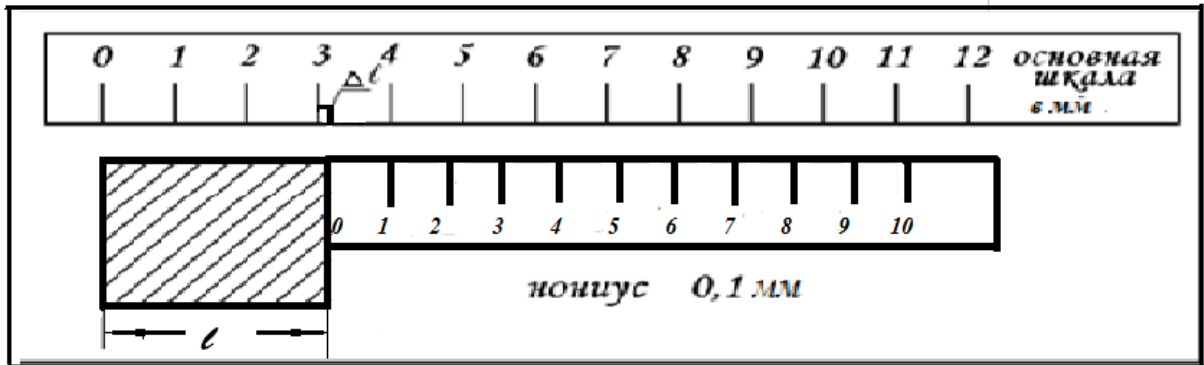


Рис. 3 б. Определение размеров с использованием шкалы нониуса

Итак, $\ell = 3 \text{ мм} + 0,1 \text{ мм} = 3,1 \text{ мм}$.

Этот же результат $0,1 \text{ мм}$ можно получить, умножив точность нониуса на номер штриха, совпадающего с каким-либо штрихом основной шкалы. При отсчёте пользуются таким правилом: *число десятых долей миллиметра равно порядковому номеру того штриха нониуса, который совпадает с каким-либо штрихом основной шкалы.*

Нониус, соединённый с измерительной линейкой, называется штангенциркулем. При измерении штангенциркулем, пользуются таким правилом: деление линейки (основной шкалы), ближайшее к нулевому штриху нониуса, даёт целое число миллиметров, содержащихся в измеряемой длине, а деление нониуса, совпавшее с каким-нибудь делением линейки, даёт число десятых долей миллиметра.

Штангенциркуль (рис.4) состоит из стальной миллиметровой линейки А, с одной стороны которой имеется неподвижная ножка В. Вторая ножка Д имеет нониус С и может перемещаться вдоль линейки А. Когда ножки В и Д соприкасаются, нулевые значения линейки и нониуса должны совпадать.

Для того чтобы измерить длину (высоту, ширину и т.д.) предмета, его помещают между ножками, которые сдвигают до соприкосновения с предметом (без сильного нажима), и закрепляют винтом Е.

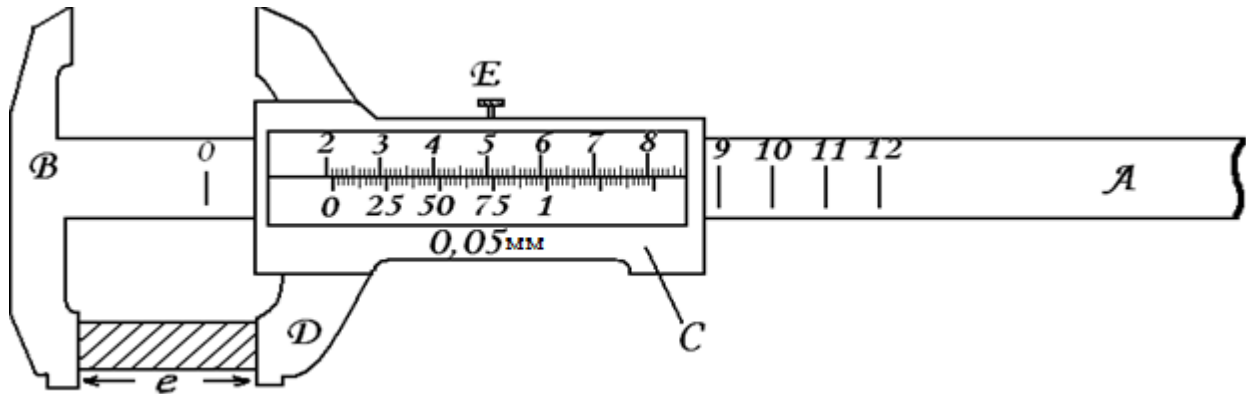


Рис. 4. Штангенциркуль

Целое число делений (мм), содержащихся в ℓ , отсчитывается от нуля основной шкалы (А) до нуля нониуса, а дробная часть миллиметра определяется с помощью нониуса. В нашем примере $\ell = 21 \text{ мм} + 0,35 \text{ мм} = 21,35 \text{ мм}$.

Микрометрический винт для измерения длины применяется в точных измерительных приборах (микрометр, микроскоп) и даёт измерения до сотых долей миллиметра.

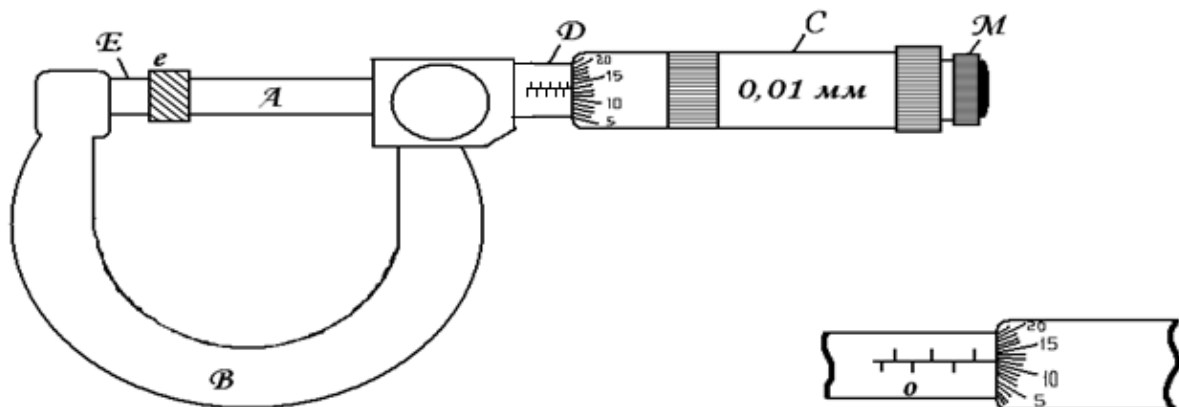


Рис. 5. Микрометр

Микрометрический винт представляет собой стержень, снабжённый точной винтовой нарезкой. Высота подъёма винтовой нарезки за один оборот называется шагом микрометрического винта. Микрометр (рис. 5) состоит из двух основных частей: скобы с пяткой (В) и микрометрического винта с

очень точной резьбой (А). Микрометрический винт (А) проходит через отверстие скобы (В) с внутренней резьбой. Против микрометрического винта на скобе имеется упор (D). На микрометрическом винте закреплён полый цилиндр - барабан со шкалой (С), коническая часть барабана, вращающегося вокруг втулки-стебля, является нониусом, где нанесено 50 делений, служащих для отсчёта сотых долей миллиметра.

Для измерений микрометром предмет помещают между торцом (Е) и микрометрическим винтом (А). Вращают винт (А) за ролик трещотки (М) до тех пор, пока измеряемый предмет не будет зажат. Вращение винта (А) производят только за ролик трещотки (М), так как в противном случае легко сбить совпадение нулей шкалы стебля (D) и барабана (С).

Стебель микрометра неподвижен. Вдоль образующей стебля проведена черта. Перпендикулярно черте с обеих сторон нанесены миллиметровые деления. Верхние риски (рис.5) смещены относительно нижних на 0,5 мм. Первая риска верхних делений находится от нулевой риски на расстоянии 0,5 мм. Шаг микрометрического винта сделан равным 0,5 мм. При повороте барабана на один оборот он поступательно перемещается вдоль поверхности стебля на 0,5 мм, иначе говоря, при повороте барабана на 50 делений он смещается вдоль стебля на 0,5 мм. Следовательно, поворот барабана на одно деление соответствует его поступательному движению вдоль стебля на

$$0,5 \text{ мм} / 50 = 0,01 \text{ мм}.$$

Какова длина ℓ , как прочесть показания микрометра? Сначала отсчитывают целое число миллиметров по нижней шкале от нуля до левого края барабана (в нашем примере на рисунке 6 внизу четыре деления, пятое не видно). Вправо за рискую, соответствующую 4 мм, на верхней шкале видна риска. Эта риска правее нижней на 0,5 мм. Длина отрезка между верхней рискую и левым краем барабана отсчитывается по делениям барабана: смотрят, какая риска барабана совпадает с рискую на стебле (в нашем примере это двенадцатая риска), $\ell = 4 \text{ мм} + 0,5 \text{ мм} + 0,13 \text{ мм} = 4,63 \text{ мм}$

Применение теории погрешностей для обработки результатов измерений в физической лаборатории

1. Измерить n раз физическую величину $x_1, x_2 \dots x_n$.
2. Найти среднее арифметическое значение этой величины.

$$\langle x \rangle = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}.$$

3. Найти абсолютную погрешность каждого отдельного измерения.

$$\Delta x_i = \langle x \rangle - x_i.$$

4. Вычислить квадраты этих величин $(\Delta x_i)^2$ и найти их сумму.

$$\sum_{i=1}^n (\Delta x_i)^2.$$

5. Найти среднюю квадратичную погрешность серии измерений.

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum (\Delta x_i)^2}{n(n-1)}}.$$

6. По заданному преподавателем числу измерений n и значению надёжности α определить коэффициент Стьюдента $t_{\alpha, n}$ по таблице коэффициентов. Найти абсолютную погрешность результата измерений (границы доверительного интервала $\pm \Delta x$).

$$\Delta x = S_x \cdot t_{\alpha, n}.$$

7. Записать результат измерений в виде доверительного интервала

$$x = \langle x \rangle \pm \Delta x \quad (\text{единицы измерений}), \text{ при } \alpha =$$

8. Вычислить относительную погрешность измерений.

$$\varepsilon = \frac{\Delta x}{\langle x \rangle} \cdot 100\%.$$

Значения коэффициентов Стьюдента

Надёжность α	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,93	0,98	0,99
n												
2	0,16	0,33	0,51	0,73	1,0	1,38	2,0	3,1	6,31	12,71	31,82	63,66
3	0,14	0,29	0,45	0,62	0,82	1,06	1,3	1,9	2,92	4,30	6,96	9,92
4	0,14	0,28	0,42	0,58	0,77	0,98	1,3	1,6	2,35	3,18	4,54	5,84
5	0,13	0,27	0,41	0,57	0,74	0,94	1,2	1,5	2,13	2,78	3,75	4,60
6	0,13	0,27	0,41	0,56	0,73	0,92	1,2	1,5	2,02	2,57	3,35	4,03
7	0,13	0,27	0,40	0,55	0,72	0,90	1,1	1,4	1,94	2,45	3,14	3,71
8	0,13	0,26	0,40	0,55	0,71	0,90	1,1	1,4	1,90	2,36	3,0	3,50
9	0,13	0,26	0,40	0,54	0,71	0,90	1,1	1,4	1,86	2,31	2,90	3,36
10	0,13	0,26	0,40	0,54	0,70	0,88	1,1	1,4	1,83	2,26	2,82	3,25

Лабораторная работа 1.0

Определение плотности твёрдого тела правильной геометрической формы

Цель: определить плотность твёрдого тела заданной конфигурации.

Приборы и принадлежности: твёрдое тело правильной формы, весы, штангенциркуль.

Краткая теория

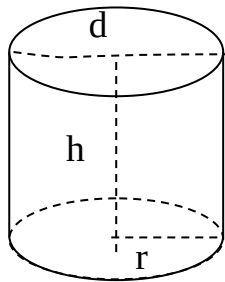
Каждое тело обладает массой. Масса (m) – одна из основных физических характеристик материи, определяющая её инертные и гравитационные свойства.

Плотностью называют массу единичного объёма.

$$\rho = \frac{m}{V}. \quad (1.0)$$

В СИ плотность выражается в $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

В качестве примера (рис 1.0.) определим плотность цилиндра.



Чтобы определить плотность, необходимо знать объём. Для цилиндра объём определяется по формуле

$$V = S_{\text{осн}} \cdot h, \quad (2.0)$$

где $S_{\text{осн}}$ – площадь основания, h – высота.

Рис. 1.0. 1 Цилиндр

Площадь основания цилиндра равна

$$S_{\text{осн}} = \frac{\pi d^2}{4}. \quad (3.0)$$

Подставляя формулу (3.0) в (2.0), а затем в (1.0), получим расчётную формулу

$$\rho = \frac{4m}{\pi d^2 h}. \quad (4.0)$$

Выполнение работы

1. Определить массу тела заданной конфигурации с помощью лабораторных весов.
2. Штангенциркулем измерить диаметр d и высоту h , результаты измерений занести в таблицу 1.0 в СИ n раз, где n – число опытов, которое задаётся преподавателем.
3. По формуле (4.0) найти значения плотности соответственно числу опытов n раз.
4. Используя правила обработки результатов при прямых измерениях, полученный результат записать в виде доверительного интервала.

№ измерения	$m_i, \text{ кг}$	$d_i, \text{ м}$	$h_i, \text{ м}$	$\rho_i, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$\Delta\rho_i$	$(\Delta\rho_i)^2$
1						
2						
3						
.						
.				$\langle \rho \rangle$		$\sum(\Delta\rho_i)^2 = \dots$

5. Выполнить заданное преподавателем индивидуальное задание на странице 86.

По представленному ниже образцу оформляются все лабораторные работы.

Образец оформления отчёта
по лабораторной работе 1

Лабораторная работа 1

Отметка о допуске _____

Отметка о выполнении _____

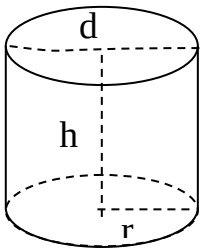
Отметка о зачёте _____

Определение плотности твёрдого тела правильной геометрической формы

Цель работы: определить плотность твёрдого тела заданной конфигурации и обработать результаты, используя теорию погрешностей при прямых измерениях

Наименование прибора	Предел измерения	Цена деления
----------------------	------------------	--------------

Штангенциркуль	$15 \cdot 10^{-2} \text{ м}$	$0,02 \cdot 10^{-2} \text{ м}$
----------------	------------------------------	--------------------------------



$$\rho = \frac{m}{V}, \quad \rho = \frac{4m}{\pi d^2 h}$$

$$\alpha = 0,9; \quad n = 3; \quad t_{\alpha,n} = 2,92$$

№ опыта	$m_i \cdot 10^{-3}, \text{ кг}$	$d_i \cdot 10^{-3}, \text{ м}$	$h_i \cdot 10^{-3}, \text{ м}$	$\rho_i \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$\Delta \rho_i$	$(\Delta \rho_i)^2$
1	71,4	45,48	70,96	619,68	0,09	$0,81 \cdot 10^{-2}$
2	71,4	45,46	70,94	620,41	-0,64	$40,96 \cdot 10^{-2}$
3	71,4	45,50	70,95	619,23	0,54	$29,16 \cdot 10^{-2}$
				$\langle \rho \rangle = 619,77$	$\sum (\Delta \rho_i)^2 = 70,93 \cdot 10^{-2}$	

$$\rho_1 = \frac{4 \cdot 71,4 \cdot 10^{-3}}{3,14 \cdot (45,48 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 70,96 \cdot 10^{-3}} = 619,68 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

$$\rho_2 = \frac{4 \cdot 71,4 \cdot 10^{-3}}{3,14 \cdot (45,46 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 70,94 \cdot 10^{-3}} = 620,41 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

$$\rho_3 = \frac{4 \cdot 71,4 \cdot 10^{-3}}{3,14 \cdot (45,50 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 70,95 \cdot 10^{-3}} = 619,23 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

$$\langle \rho \rangle = \frac{(619,68 + 620,41 + 619,23)}{3} = 619,77 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

$$\langle \rho \rangle = 619,77 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

$$\Delta \rho = \langle \rho \rangle - \rho_i$$

$$\Delta \rho_1 = (619,77 - 619,68) = 0,09 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \quad (\Delta \rho_1)^2 = 0,81 \cdot 10^{-2}$$

$$\Delta\rho_2 = (619,77 - 620,41) = -0,64 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \quad (\Delta\rho_2)^2 = 40,96 \cdot 10^{-2}$$

$$\Delta\rho_3 = (619,77 - 619,23) = 0,54 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \quad (\Delta\rho_3)^2 = 29,16 \cdot 10^{-2}$$

$$\sum (\Delta\rho_i)^2 = 70,93 \cdot 10^{-2}$$

$$S_\rho = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta\rho_i)^2}{n(n-1)}} = \sqrt{\frac{0,7093}{3(3-1)}} = \sqrt{0,12} = 0,34$$

$$\Delta\rho = t_{\alpha,n} \cdot S_\rho = 2,92 \cdot 0,34 = 0,99 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

$$\rho = |\langle\rho\rangle \pm \Delta\rho| \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \quad \text{при } \alpha = 0,9$$

$$\rho = |619,77 \pm 0,99| \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \quad \text{при } \alpha = 0,9$$

$$\varepsilon = \frac{0,99}{619,77} \cdot 100\% = 0,2\%$$

Вывод: в ходе работы определили плотность цилиндра, изготовленного, возможно, из кедра, применили теорию погрешностей.

Лабораторная работа 2

Определение модуля упругости методом изгиба (модуля Юнга)

Цель работы: определить модуль Юнга.

Приборы и принадлежности: подвижные стойки с призматическими опорами, исследуемые стержни с прямоугольным сечением, отсчётный микроскоп, штангенциркуль, линейка со шкалой, набор грузов.

Краткая теория

Твёрдые тела имеют кристаллическое строение, то есть частицы, составляющие твёрдое тело, расположены в определённом порядке. Каждая частица испытывает воздействие со стороны всех соседних частиц и её равновесие соответствует тому, что равнодействующая этих сил равна нулю.

Деформацией твёрдого тела называют *изменение его размеров и формы*, обычно сопровождающееся изменением объёма тела.

Деформации тела вызываются изменением температуры или действием на него внешних сил. При деформации происходит смещение частиц, находящихся в узлах кристаллических решёток твёрдых тел, из первоначальных положений равновесия в новое. Этому смещению препятствуют силы взаимодействия между частицами. В результате в деформированном теле возникают упругие внутренние силы.

Если после прекращения действия сил, вызывающих деформацию, она исчезнет, такую деформацию называют *упругой*.

Неупругие деформации твёрдого тела сопровождаются необратимой перестройкой его кристаллической решётки. В этом случае наблюдаются остаточные, или пластические деформации тела.

Упругие деформации имеют место тогда, когда внешние силы, вызывающие деформацию, не превосходят некоторого определённого для каждого тела предела, называемого *пределом упругости*.

При установившейся упругой деформации результирующая упругих внутренних сил в любом сечении тела уравнивает внешние силы, действующие на тело. Поэтому при упругой деформации величина упругих внутренних сил будет определена по величине внешних сил, приложенных к телу. Величину упругих внутренних сил характеризует напряжение σ . Напряжение численно равно результирующей упругих сил F , действующей на единицу площади сечения тела S

$$\sigma = \frac{F}{S} . \quad (2.1)$$

Когда сила $\vec{F}$ направлена по нормали к поверхности S , напряжение называют *нормальным*.

Мерой деформации является относительная деформация ε , равная отношению абсолютной деформации Δx к первоначальному значению величины x , характеризующей размеры или объём тела

$$\varepsilon = \frac{\Delta x}{x} . \quad (2.2)$$

Английский физик Р. Гук в 1675 г. опытным путём установил, что напряжение, возникающее в упруго деформированном теле, прямо пропорционально относительной деформации

$$\sigma = \kappa \cdot \varepsilon, \quad (2.3)$$

где κ - коэффициент пропорциональности, называемый *модулем упругости*. Соотношение (2.3) выражает закон Гука для любого вида упругих деформаций. При продольном растяжении или сжатии модуль упругости называется модулем Юнга и обозначается E . Следовательно, закон Гука примет вид

$$\sigma = E \frac{\Delta \ell}{\ell}, \quad (2.4)$$

где $\frac{\Delta \ell}{\ell} = \frac{\Delta x}{x}$ - относительное удлинение.

Из формул (2.1) и (2.4) следует $E = \frac{F \ell}{S \Delta \ell}$. (2.5)

Модуль Юнга является постоянной величиной для данного вещества и его значение зависит только от материала, из которого изготовлено деформируемое тело. Если $\Delta \ell = \ell$, то $E = \sigma$, то есть модуль Юнга численно равен напряжению, которое возникло бы в образце при увеличении его длины в два раза (в этом заключается *физический* смысл модуля Юнга). В

СИ модуль Юнга измеряется в паскалях $1 \text{ Па} = \frac{1 \text{ Н}}{1 \text{ м}^2} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$.

В настоящей работе модуль Юнга предложенных стержней (металлического и изготовленных из различных видов дерева), определяется из деформации изгиба. Схема установки к работе представлена на рисунке 2.1. Необходимо определить модуль Юнга каждого стержня и сравнить полученные результаты. Действие силы тяжести груза $\vec{P}$ вызывает деформацию изгиба, то есть верхние слои сжимаются, нижние растягиваются, а некоторый слой-нейтральный, сохраняет длину и только претерпевает искривление. Перемещение, которое получает середина стержня, называется *стрелой прогиба* λ (рис. 2.1). В теории сопротивления материалов доказывается, что если к стержню длиной ℓ , шириной a и

высотой b приложить в середине силу $\vec{F}(\vec{P})$ то стрела прогиба определяется

по формуле: $\lambda = \frac{P\ell^3}{4Eab^3}$.

Зная стрелу прогиба λ , находим модуль Юнга по формуле

$$E = \frac{P\ell^3}{4\lambda ab^3}, \quad (2.6)$$

где $\vec{P} = m\vec{g}$ - сила, вызывающая деформацию;

ℓ - длина стержня; a - ширина поперечного сечения; b - высота.

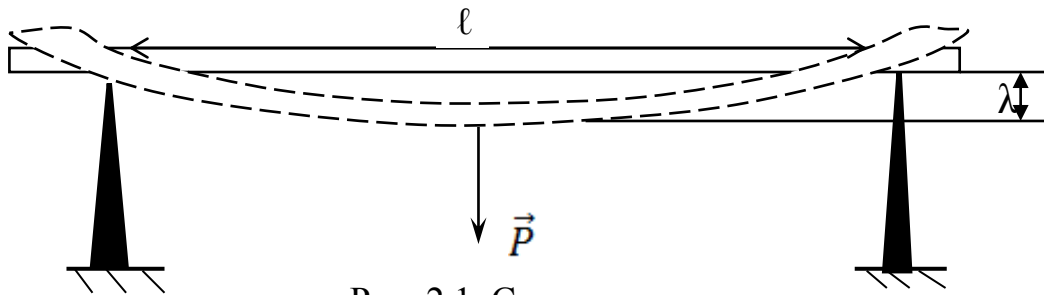


Рис. 2.1. Схема установки

Выполнение работы

1. Подвижные стойки с призмами установить на заданном преподавателем расстоянии от точек опоры, ℓ_1 и ℓ_2 .

2. Измерить штангенциркулем ширину a и высоту b поперечного сечения каждого стержня в нескольких местах и определить их средние значения.

3. Навести отсчётный микроскоп на край стержня так, чтобы нуль шкалы микроскопа совпадал с этим краем.

4. Постепенно нагружая грузами массами $m_1, m_2, m_3, \dots$ исследуемый стержень, соответственно определить по шкале микроскопа число делений, на которое произошёл прогиб стержня, $n'_1, n'_2, n'_3, \dots, n'_k$.

5. Снимая грузы в обратном порядке и, делая отсчёты прогиба по микроскопу в соответствии с нагрузкой, получить $n''_k, \dots, n''_3, n''_2, n''_1$.

6. Найти средние значения делений изгиба стержня для всех грузов массами $m_1, m_2, m_3, \dots, m_k$, по формуле

$$\langle n_i \rangle = \frac{n'_i + n''_i}{2}.$$

7. Опыт повторить для другого стержня.

8. Для определения цены деления отсчётного микроскопа привести микроскоп на миллиметровую шкалу и, перемещением микроскопа добиться чёткого изображения, подсчитать, сколько делений шкалы микроскопа N укладывается в 1 мм миллиметровой шкалы, (если цена деления не указана на шкале микроскопа).

Цена деления в системе СИ определяется по формуле

$$k = \frac{1}{N} \cdot 10^{-3} \frac{\text{м}}{\text{дел}},$$

где k - цена деления отсчётного микроскопа;

N - число делений микроскопа в 1 мм.

9. Если работа ведётся с индикатором, то действием пунктов 4, 5, 6 находятся непосредственно значения λ_i , в действии п.8 нет необходимости.

10. Найти стрелу прогиба для всех сил $\vec{P}_1, \vec{P}_2, \vec{P}_3, \dots, \vec{P}_k$ по формуле $\lambda_i = k \langle n_i \rangle$.

11. По формуле (2.6) найти значения $E_1, E_2, E_3, \dots, E_i$.

12. Построить графики изменения стрелы прогиба λ от нагрузки P , для каждого стержня, сравнить их и сделать выводы.

13. Результаты измерений и вычислений занести в таблицы 2.1 (для одного стержня) и 2.2. (для другого стержня).

$$\ell_1 = \dots \mathcal{M}, \quad m_1 = \dots, m_2 = \dots, m_3 = \dots, \dots m_n = \dots$$

Таблица 2.1

	$a_i, \mathcal{M}$	$b_i, \mathcal{M}$	n'_i	n''_i	$\langle n_i \rangle$	$\lambda_{i,\mathcal{M}}$	$P_i H$	$E_i \Pi a$	ΔE_i	$(\Delta E_i)^2$
1										
2										
3										
...	$\langle a \rangle$	$\langle b \rangle$						$\langle E \rangle$		$\sum (\Delta E_i) = \dots$

$$\ell_2 = \dots \mathcal{M}$$

Таблица 2.2

[illegible]

3										
...	$\langle a \rangle$	$\langle b \rangle$						$\langle E \rangle$		$\sum (\Delta E_i) = \dots$

12. Пользуясь справочником, сравнить:

- полученное в работе значение E для каждого стержня с табличным;
- сделать вывод о различии в упругих свойствах, взятых для сравнения стержней.

Контрольные вопросы

- Что называется деформацией? Способы деформации тел?
- Какая деформация называется упругой? Пластической?
- Какой цилиндр - полый или сплошной более прочный? Почему?
- Что называется нормальным напряжением? Пределом упругости?
- Что называют относительной деформацией?
- Дать формулировку и записать закон Гука (общий случай).
- Записать формулу закона Гука для продольного растяжения.
- Что называют модулем Юнга? Единица модуля упругости в СИ?
- Как измерить стрелу прогиба?

Лабораторная работа 3

Изучение законов и определение характеристик вращательного движения твёрдого тела

Цель работы: определить характеристики и изучить законы вращательного движения.

Приборы и принадлежности: маятник Обербека, линейка, штангенциркуль, секундомер, набор грузов.

Краткая теория

Вращательным движением твёрдого тела называется такое движение, при котором все точки тела движутся по окружности, центры которых лежат на одной и той же прямой, называемой осью вращения.

Вращательное движение характеризуется угловой скоростью вращения $\vec{\omega}$ и угловым ускорением $\vec{\epsilon}$. Направление вектора $\vec{\epsilon}$ совпадает с направлением вектора $\vec{\omega}$, если $\vec{\omega}$ возрастает (рис. 3.1 а), (вектор $\vec{\epsilon}$ направлен в противоположную сторону, если $\vec{\omega}$ убывает).

При вращательном движении тела изменение его кинематических величин зависит от действующего на тело вращающего момента $\vec{M}$ и от момента инерции тела J .

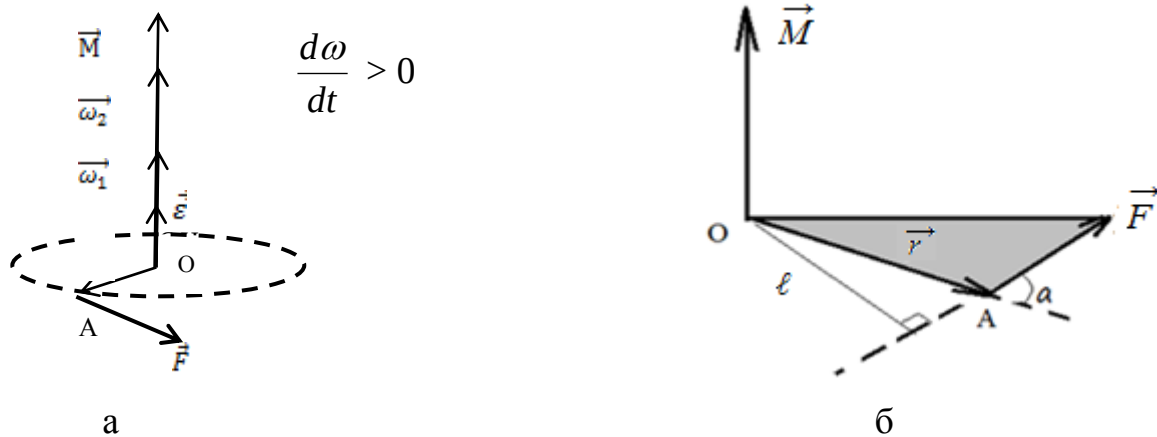


Рис. 3.1. Направление характеристик вращательного движения

Вращательным моментом, или моментом вращающей силы называется векторная физическая величина $\vec{M}$, определяемая векторным произведением радиуса – вектора $\vec{r}$, проведённого из точки O в точку приложения силы A на силу $\vec{F}$ (рис. 3.1 б).

$$\vec{M} = [\vec{r}\vec{F}]$$

$\vec{M}$ - *псевдовектор*, его направление совпадает с направлением поступательного движения правого винта при его вращении от $\vec{r}$ к $\vec{F}$.

$||[\vec{r}\vec{F}]||$ - модуль векторного произведения векторов равен

$$M = F \cdot r \cdot \sin \alpha, \quad (3.1)$$

так как $\ell = r \sin \alpha$ (рис. 3.1 б), где ℓ - плечо силы, то есть кратчайшее расстояние между линией действия силы и точкой O .

Момент силы $\vec{M}$ является мерой вращающего действия силы на тело, а момент инерции J является мерой инертности тела при действии на него вращающего момента.

Момент инерции системы (тела) относительно данной оси есть физическая величина, равная сумме произведений масс m материальных точек системы на квадраты их расстояний до рассматриваемой оси.

$$J = \sum_{i=1}^n m_i \cdot r_i^2.$$

Момент инерции зависит не только от массы тела, но и от её распределения относительно оси вращения.

Основной закон динамики вращательного движения говорит о том, что угловое ускорение, приобретаемое телом под действием вращающего момента, пропорционально вращающему моменту сил и обратно пропорционально моменту инерции тела, то есть

$$\vec{\varepsilon} = \frac{\vec{M}}{J}. \quad (3.2)$$

Кинетическая энергия вращающегося тела определяется по формуле

$$W_k = \frac{J\omega^2}{2}, \quad (3.3)$$

где J – момент инерции;

ω – угловая скорость.

Определение момента инерции и изучение законов динамики вращательного движения проводим при помощи маятника Обербека (рис.3.2).

Он представляет собой крестовину, состоящую из четырёх стержней,

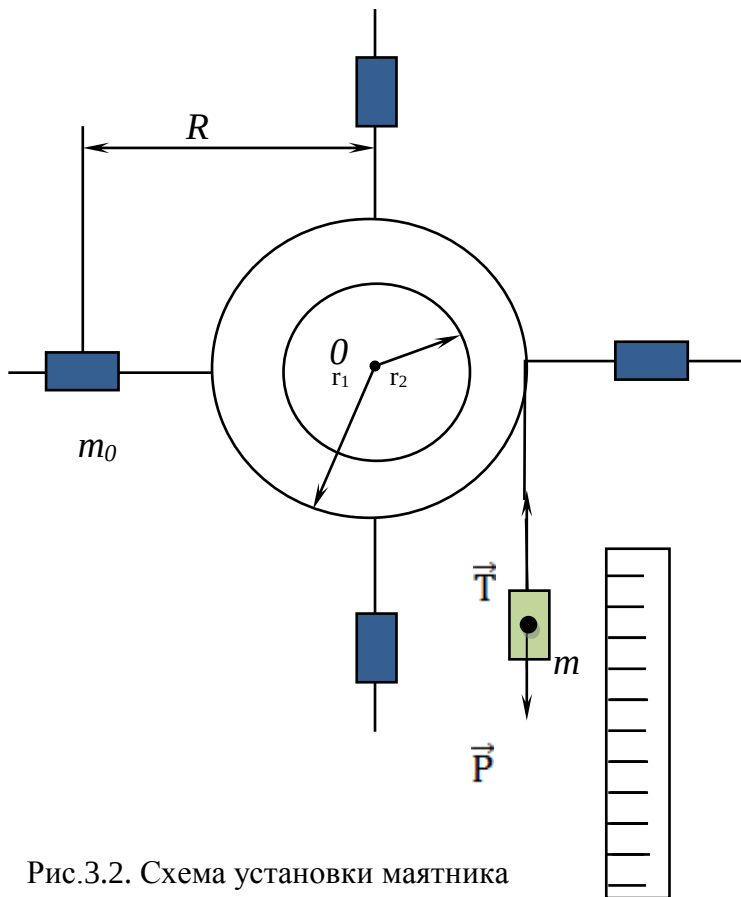


Рис.3.2. Схема установки маятника
Обербека

расположенных в одной плоскости под углом 90° друг к другу, прикрепленных к втулке с осью. На стержни надевают грузы одинаковой массы m_0 , которые могут быть закреплены на различных расстояниях от оси вращения. Два лёгких шкива с различными радиусами r_1 и r_2 насажены на ось вращения маятника. На шкив наматывается нить, к свободному концу которой прикрепляется груз массы m .

Под действием груза нить разматывается и приводит маятник во вращательное движение с ускорением a . На тело действуют две силы: сила тяжести $\vec{P}$, направленная вниз, и сила натяжения нити $\vec{T}$, направленная вверх. Согласно II закону Ньютона запишем уравнение, учитывая, что под действием результирующей силы $\vec{F}$ тело движется вниз:

$$T = P - F = m(g - a).$$

Момент силы натяжения шнура вызывает вращение системы

$$M = T \cdot r,$$

где r – радиус шкива.

$$M = m \cdot (g - a) r. \quad (3.4)$$

Груз, двигаясь равноускорено, за время t опускается на высоту h , линейное ускорение можно определить по формуле

$$a = \frac{2h}{t^2}. \quad (3.5)$$

Учитывая, связь линейного ускорения и углового $a = \varepsilon r$, получим

$$\varepsilon = \frac{2h}{rt^2} . \quad (3.6)$$

Тогда
$$J = \frac{M}{\varepsilon} = \frac{m \cdot r^2 \cdot t^2 \left(g - \frac{2h}{t^2} \right)}{2h} . \quad (3.7)$$

При падении груза его потенциальная энергия $W_n = mgh$ переходит в кинетическую энергию поступательного движения $W_k = \frac{mv^2}{2}$,

кинетическую энергию вращательного движения системы $\frac{J\omega^2}{2}$ и работу сил трения $A = f_{mp} \cdot h$ (эту работу учитывать не будем).

По закону сохранения энергии

$$mgh = \frac{mv^2}{2} + \frac{J\omega^2}{2} . \quad (3.8)$$

Учитывая, что $v = at = \frac{2h}{t^2} t = \frac{2h}{t}$, $\omega = \frac{v}{r} = \frac{2h}{t \cdot r}$,

уравнение (3.8) примет вид

$$mgh = \frac{m \cdot 4 \cdot h^2}{2t^2} + \frac{J \cdot 4h^2}{2t^2 \cdot r^2} = \frac{2m \cdot h^2}{t^2} + \frac{2J \cdot h^2}{t^2 \cdot r^2} = \frac{2h^2}{t^2} \left(m + \frac{J}{r^2} \right),$$

$$mgh = \frac{2h^2}{t^2} \left(m + \frac{J}{r^2} \right). \quad (3.9)$$

Выполнение работы

1. Закрепить цилиндрические грузы на одинаковом расстоянии R от оси на стержнях (R задаёт преподаватель).
2. Штангенциркулем измерить диаметр шкива d , определить радиус r и намотать на шкив нить, поднимая груз на высоту h .
3. С помощью секундомера определить время t падения груза с высоты h .
4. Повторить опыт, изменяя массу грузов m и высоту h .
5. Вычислить J , ε и M для каждого опыта (по формулам (3.7), (3.6) и (3.4)).
6. Повторить п.п. 3, 4, 5, поместив цилиндрические грузы как можно ближе к шкиву, сравнить J .
7. Проверить закон сохранения энергии, используя формулу (3.9).
8. Все результаты занести в таблицу 3.1.

$$R=\dots(m), \quad d=\dots(m),$$

Таблица 3.1

	$m_i, \text{кг}$	$h_i, \text{м}$	$t_i, \text{с}$	$J_i, \text{кг} \cdot \text{м}^2$	ΔJ_i	$(\Delta J_i)^2$	$M, \text{Н} \cdot \text{м}$	$\frac{\varepsilon, \text{рад}}{c^2}$	$W_n, \text{Дж}$	$W_k, \text{Дж}$
1										
2										
3										
.										
.				$\langle J \rangle$		$\sum (\Delta J_i)^2 = \dots$				

10. Построить график функции $\varepsilon = f(M)$ и сделать вывод о характере этой зависимости.

Контрольные вопросы

1. Назовите основные динамические характеристики вращательного движения.
2. Что называется моментом инерции материальной точки тела?
3. Что называют моментом силы, как определяется его направление, единицы измерения?
4. Дать определение углового ускорения тела.
5. Сформулируйте основной закон динамики вращательного движения.
6. Что называется кинетической и потенциальной энергией? Приведите примеры.
7. Вывести формулу кинетической энергии тела при вращательном движении.
8. Сформулировать закон сохранения энергии для изолированной системы.
9. Вывести формулу (3.9).

Лабораторная работа 4

Изучение колебаний пружинного маятника

Цель работы: изучение характеристик гармонических колебаний и определение жёсткости пружины.

Приборы и принадлежности: штатив с пружиной, набор грузов, секундомер.

Краткая теория

Колебаниями называются движения или процессы, которые характеризуются определённой повторяемостью во времени. В зависимости от физической природы колебательного процесса и механизма его возбуждения различают: механические колебания (колебания маятников, струн, частей машин и механизмов, зданий, мостов и других сооружений, давления воздуха при распространении в нём звука, качка корабля, волнение моря и так далее); электромагнитные (колебания переменного электрического тока в цепи, колебания векторов $\vec{E}$ и $\vec{B}$ электрической напряжённости и магнитной индукции переменного электромагнитного поля и так далее); электромеханические (колебания мембраны телефона, диффузора электродинамического громкоговорителя и так далее) и др. Система, совершающая колебания, называется колебательной.

Колебания называются собственными, если они совершаются за счёт первоначально сообщённой энергии при последующем отсутствии внешних воздействий на колебательную систему. *Колебания* называются периодическими, если значения всех физических величин, характеризующих колебательную систему и изменяющихся при её колебаниях, повторяются через равные промежутки времени.

Время, за которое совершается полное колебание, называется периодом колебаний или $T = \frac{t}{n}$. За период T система совершает одно полное колебание. Частотой периодических колебаний называется величина $\nu = \frac{1}{T}$, равная числу полных колебаний, совершающихся за единицу времени или величина, обратная периоду. Циклической (круговой) частотой периодических колебаний называется величина $\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T}$, равная числу полных колебаний, совершающихся за 2π единиц времени.

Простейшим типом колебаний являются гармонические колебания – колебания, при которых колеблющаяся величина изменяется со временем по закону синуса (косинуса). Гармонические колебания величины x описываются уравнением типа

$$x = A \sin(\omega t + \varphi_0),$$

где A - максимальное значение колеблющейся величины, называемое амплитудой колебания;

ω - циклическая (круговая) частота;

φ_0 - начальная фаза колебания в момент времени $t = 0$;

$(\omega t + \varphi_0)$ – фаза колебаний в момент времени t .

Скорость v и ускорение a колеблющейся точки соответственно равны

$$v = \frac{dx}{dt} = A\omega \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi_0),$$

$$a = \frac{dv}{dt} = -A\omega^2 \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_0) = -\omega^2 x.$$

Гармонические колебания вызываются упругими и квазиупругими силами. Примером гармонического колебания является колебание *пружинного маятника*. Пружинный маятник – это груз массой m , подвешенный на упругой пружине и совершающий гармонические колебания под действием упругой силы $F_{упр} = -kx$, где k - коэффициент упругости пружины, x – смещение. По второму закону Ньютона $m \cdot \vec{a} = \vec{F}_{упр}$.

Таким образом, уравнение движения пружинного маятника имеет вид

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = -kx \quad (4.1) \quad \text{или} \quad m \frac{d^2 x}{dt^2} + kx = 0. \quad (4.2)$$

Уравнение (4.2) является дифференциальным уравнением гармонических колебаний

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + \frac{k}{m} x = 0, \quad (4.3)$$

которое имеет решение в виде $x = A \sin(\omega t + \varphi_0)$ с циклической частотой ω и периодом T :

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}, \quad (4.4)$$

$$k = m\omega^2 = \frac{4\pi^2 m}{T^2}. \quad (4.5)$$

Упругость – свойство тел деформироваться под действием нагрузок и самопроизвольно восстанавливать свою первоначальную форму и свой первоначальный объем при их снятии.

$$T^2 = \frac{4\pi^2 m}{k} = Cm,$$

$$C = \frac{4\pi^2}{k}, \quad (4.6) \quad \text{и} \quad C = \frac{T^2}{m}, \quad (4.7)$$

где C - жёсткость пружины.

Жёсткость – это мера податливости тела деформации при заданном типе нагрузки. Чем больше жёсткость, тем меньше деформация. Жёсткость пружины зависит от материала, размеров и длины пружины.

Выполнение работы

Установка (рис. 4.1) состоит из штатива со шкалой и пружиной, к которой подвешиваются грузы массой $m_1, m_2, \dots$

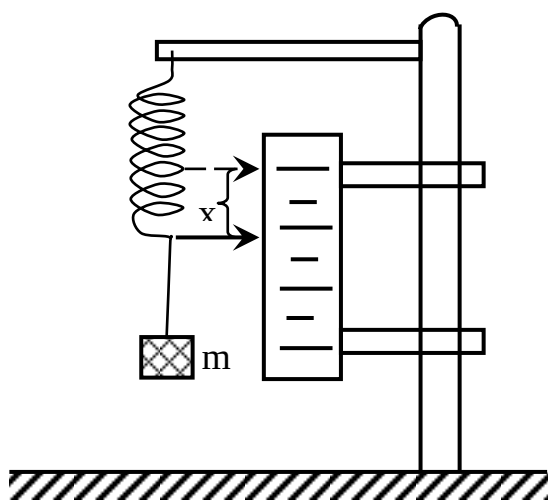


Рис. 4.1. Пружинный маятник

1. Заметить начальное положение указателя на миллиметровой вертикальной шкале.
2. Подвешивая различные грузы $m_1, m_2, \dots$, определить соответствующие смещения $x_1, x_2, \dots$

3. Вычислить коэффициент упругости по формуле

$$k = \frac{F}{x} = \frac{P}{x} = \frac{mg}{x}$$

при различных грузах $m_1, m_2, \dots$ и соответствующих смещениях.

4. Груз слегка приподнять и затем отпустить. По секундомеру измерить время t для n колебаний ($n > 15$) и по формуле $T = \frac{t}{n}$ найти период

колебаний. Измерения сделать несколько раз, меняя массу грузов и число колебаний (по заданию преподавателя).

5. По формуле (4.7) вычислить коэффициент жёсткости.

6. Вычислить коэффициент жёсткости по формуле (4.6) и сравнить с результатами предыдущих вычислений по формуле (4.7).

7. Результаты измерений и вычислений занести в таблицу 4.1.

Таблица 4.1

	$m_i, \text{кг}$	$P_i, \text{Н}$	$x_i, \text{м}$	$k_i, \frac{\text{Н}}{\text{м}}$	n_i	$t_i, \text{с}$	$T_i, \text{с}$	$C_i, \frac{\text{м}}{\text{Н}}$	ΔC_i	$(\Delta C_i)^2$
1										
2										
3										
....								$\langle C \rangle$		$\sum (\Delta C_i)^2 = \dots$

Контрольные вопросы

1. Что называется колебательным движением?
2. Какие колебания называются свободными, периодическими, гармоническими?
3. Дайте определения амплитуды колебаний, частоты колебаний, периода колебаний, фазы колебаний.
4. Какая сила вызывает гармонические колебания пружинного маятника?
5. Запишите основное уравнение динамики гармонических колебаний.
6. Объяснить физический смысл коэффициента упругости, дать определение жёсткости пружины.
7. Чему равна потенциальная энергия пружинного маятника?

Лабораторная работа 5

Определение момента инерции физического маятника

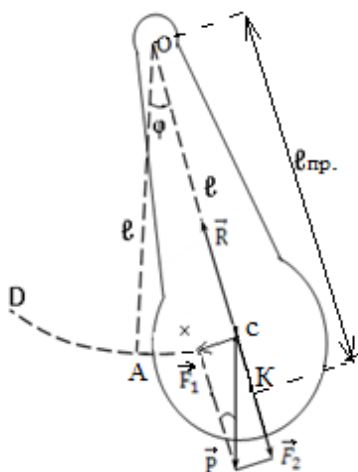
Цель работы: определить момент инерции физического маятника методом гармонических колебаний.

Приборы и принадлежности: физический маятник, отвес, линейка, секундомер.

Краткая теория

Физический маятник – это твёрдое тело, совершающее под действием силы тяжести колебания вокруг неподвижной горизонтальной оси, проходящей через точку О, не совпадающую с центром масс С тела (рис. 5.1). У твёрдых тел центр масс С совпадает с центром тяжести, который определяется на пересечении линий, проведённых по отвесу из различных точек подвеса свободного твёрдого тела.

Расстояние от оси подвеса до центра масс С обозначим ℓ . Если маятник



отклонён из положения равновесия на некоторый угол φ , то составляющая $\vec{F}_1$ силы тяжести $\vec{P}$ возвращает маятник к положению равновесия. Составляющая $\vec{F}_2$ уравнивается реакцией опоры $\vec{R}$. Возвращающий момент $\vec{M}$, создаваемый силой $\vec{F}_1$, равен

$$M = - F_1 \ell = - mg \ell \sin \varphi, \quad (5.1)$$

Рис.5.1. Физический маятник где ℓ - плечо силы $\vec{F}_1$ (расстояние от центра масс С маятника до оси качания О), а знак «-» показывает, что сила направлена противоположно угловому смещению φ . В случае, когда $\varphi < 5^\circ$, $\sin \varphi$ примерно равен φ , выраженному в радианах ($\sin \varphi \approx \varphi$) и уравнение (5.1) примет вид

$$M = - mg \ell \varphi. \quad (5.2)$$

По основному уравнению динамики вращательного движения

$$M = J\varepsilon = J \frac{d^2\varphi}{dt^2}, \quad (5.3)$$

где J – момент инерции маятника относительно оси вращения O .

Из формул (5.2) и (5.3) следует, что $J\varepsilon = -mg\ell \varphi$, или

$$J \frac{d^2\varphi}{dt^2} + \frac{mg\ell}{J} \varphi = 0. \quad (5.4)$$

Основное уравнение динамики свободных гармонических колебаний имеет вид

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \omega^2 x = 0, \quad (5.5)$$

где x – смещение, ω – циклическая частота.

Из сравнения (5.4) и (5.5) следует, что физический маятник совершает под действием силы $\vec{F}_1$ гармонические колебания. По аналогии с (5.5) величина $\frac{mg\ell}{J}$ есть квадрат циклической частоты колебаний маятника

$$\omega^2 = \frac{mg\ell}{J}. \quad (5.6)$$

Так как $\omega = \frac{2\pi}{T}$, где T – период колебаний маятника, то

$$\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 = \frac{mg\ell}{J}. \quad (5.7)$$

Из равенства (5.7) момент инерции относительно оси O равен

$$J_i = \frac{mg\ell T_i^2}{4\pi^2}. \quad (5.8)$$

Момент инерции измеряется в (кг · м²).

Для того, чтобы тело совершало гармоническое колебательное движение, на него должна действовать сила, всегда направленная к положению равновесия, а по величине – прямо пропорциональная смещению от этого положения.

Колебания, происходящие в системе, за счёт первоначально сообщённой энергии при отсутствии внешних сил (но при наличии потерь на трение или излучение), называются *свободными*.

Колебательные движения в механических системах сопровождаются периодическими превращениями кинетической энергии колеблющихся тел в потенциальную энергию взаимодействия и обратно. При этом энергией колебаний называют ту часть полной энергии системы, которая участвует в этих превращениях.

Теорема Штейнера: момент инерции тела относительно произвольной оси равен сумме момента инерции тела относительно оси, проходящей через центр масс тела и произведения массы этого тела на квадрат расстояния между осями. $J = J_c + m\ell^2$. По теореме Шнейнера можно определить момент инерции маятника относительно оси, проходящей через центр масс тела и параллельной заданной оси подвеса $\langle J \rangle = J_c + m\ell^2$. (5.9)

Приведённой длиной $\ell_{пр}$ физического маятника называется длина такого воображаемого математического маятника, который имеет период, равный периоду колебаний данного физического маятника.

Точка К, находящаяся на расстоянии $\ell_{пр}$ от оси подвеса, называется центром качания физического маятника. Точка подвеса О и центр качания К обладают свойством взаимозаменяемости. При этом период колебаний физического маятника не изменяется.

Периоды колебаний математического и физического маятников соответственно определяются по формулам

$$T_{mat} = 2\pi\sqrt{\frac{\ell}{g}}. \quad (5.10)$$

$$T_{физ} = 2\pi\sqrt{\frac{J}{mg\ell}}. \quad (5.11)$$

Подставляем (5.10) и (5.11) в равенство $T_{mat} = T_{физ}$ и получаем

$$\ell_{пр} = \frac{\langle J \rangle}{m\ell}, \quad (5.12)$$

где ℓ – расстояние от оси подвеса маятника до его центра масс.

Выполнение работы

1. Определить положение центра масс С относительно точки подвеса О. Подвешивая маятник в различных точках, наметить по отвесу линии расположения центра масс С. Точка пересечения этих линий определит положение центра масс.

2. Отклонив маятник на небольшой угол, дать возможность ему свободно колебаться. Пользуясь секундомером, определить время n колебаний

($n = 30 - 60$ колебаний). Найти период колебаний по формуле $T = \frac{t}{n}$,

где t – время. Период определить несколько раз, меняя число колебаний n .

3. Измерить расстояние ℓ от оси подвеса O до центра тяжести C .

4. По формуле (5.8) вычислить момент инерции маятника для нескольких осей подвеса (по заданию преподавателя), сравнить их и объяснить полученные результаты.

5. По формуле (5.9) найти момент инерции относительно центра масс C по найденным моментам инерции относительно заданных осей, сравнить результаты.

$$m = \dots \text{кг}, \quad \ell_{np} = \dots \text{м}, \quad J_C = \dots \text{кг} \cdot \text{м}^2.$$

Таблица 5.1

	Ось подвеса	$\ell_{i,m}$	n_i	$t_{i,c}$	$T_{i,c}$	$J_{i,\text{кг} \cdot \text{м}^2}$	ΔJ_i	$(\Delta J_i)^2$
1								
2								
3...								
1								
2								
3...								
						$\langle J \rangle$		$\sum (J_i)^2 = \dots$

6.

Исп

ольз

уя

фор

мул

у (5.12), определить приведённую длину физического маятника для заданной оси подвеса. Указать положение центра качания, сравнить ℓ_{np} со

$$\text{значением } \ell_{np} = \frac{T^2 g}{4\pi^2}.$$

7. Результаты измерений и вычислений занести в таблицу 5.1.

8. Сделать вывод о зависимости момента инерции физического маятника от выбора оси вращения, пользуясь данными проведённого эксперимента.

Контрольные вопросы

1. Каков физический смысл момента инерции тела? Чему равен момент инерции материальной точки, твёрдого тела?

2. От чего зависит момент инерции тела? Единицы измерения момента инерции тела?
3. Записать уравнение динамики свободных гармонических колебаний.
4. Дать определение параметрам гармонического колебания: A , T , ω , φ_0 .
5. Что называется центром масс?
6. Какой маятник называется физическим? Записать период колебаний физического маятника.
7. Сформулировать теорему Штейнера.
8. Что называется приведённой длиной физического маятника?

Лабораторная работа 6

Определение коэффициента трения качения методом наклонного маятника

Цель работы: изучение силы трения качения и определение коэффициента трения качения методом наклонного маятника.

Приборы и принадлежности: лабораторная установка

Краткая теория

Известно, что всякое тело, движущееся по горизонтальной поверхности другого тела, при отсутствии действия на него других сил с течением времени замедляет своё движение и, в конце концов, останавливается. Это объясняется существованием **силы трения**, препятствующей скольжению соприкасающихся тел друг относительно друга. Силы трения зависят от относительных скоростей тел. Они могут быть разной природы, но в результате их действия осуществляется необратимый переход всех видов энергии в теплоту.

Различают **внешнее** (сухое) и **внутреннее** (жидкое или вязкое) трение.

Сухое трение подразделяется на:

- 1) *трение покоя* – трение при отсутствии относительного перемещения соприкасающихся тел;

- 2) *трение скольжения, качения или верчения* – трение в зависимости от характера относительного движения соприкасающихся тел мости.

Трение играет большую роль в природе и технике. Благодаря трению движется и останавливается транспорт, трение удерживает корни растений в почве, песок – в железнодорожной насыпи, забитый в стену гвоздь и т.д. В некоторых случаях трение играет вредное воздействие и его необходимо уменьшать. Для этого на соприкасающиеся тела наносят смазку (сила трения уменьшается в 10 раз), которая заполняет неровности между этими поверхностями и тела скользят относительно друг друга. Одним из способов уменьшения трения является замена скольжения *качением*: применение колёс, катков, шариковых и роликовых подшипников. Коэффициент трения качения в десятки раз меньше коэффициента трения скольжения. В природе трение качения встречается редко. Можно указать на шарообразность семян некоторых растений (горох, каштан, орех, жёлуди), способствующую откатыванию этих семян на более далёкие расстояния от материнского растения.

Трение качения возникает при качении по плоской поверхности тел, обладающих осевой симметрией (цилиндр, шар).

Можно считать, что трение качения является результатом деформаций тела и поверхности при их контакте. На поверхности возникает углубление под телом и выступ («валик») перед ним, то есть тело соприкасается не в одной точке, а на некотором участке конечной площади.

Линия действия силы реакции опоры $\vec{N}$ плоской поверхности из-за деформаций не совпадает с линией действия силы нормального давления $\vec{P}$ тела (рис. 6.1), и возникает момент силы реакции относительно оси OO' , замедляющий вращение тела.

Сила трения качения $\vec{F}_{\text{тк}}$ – касательная к плоскости составляющая, сила нормальной реакции $\vec{N}_n$ – нормальная к плоскости составляющая силы реакции – (рис. 6.1).

Момент силы нормальной реакции относительно оси вращения называют моментом силы трения $M_{\text{тк}}$, т.е.

$$M_{\text{тк}} = k \cdot N_n, \quad (6.1)$$

где k – плечо силы N_n , если деформации остаточные, то $N_n \approx P$ и можно считать, что

$$M_{\text{тк}} \approx k \cdot P. \quad (6.2)$$

Сила трения качения $F_{\text{тк}}$ пропорциональна моменту силы трения, записанному в виде (6.2), и обратно пропорциональна радиусу R катящегося тела, поэтому у транспорта, предназначенного для движения по неровным дорогам, колёса имеют большой радиус

$$F_{\text{тк}} \approx \frac{kP}{R}. \quad (6.3)$$

Это выражение (6.3) носит название закона Кулона. Параметр k в (6.3) называют коэффициентом момента силы трения качения или коэффициентом трения качения, который имеет размерность длины $\dim k = L$ и является плечом нормальной реакции плоскости относительно оси вращения. Коэффициент k зависит от материала, физического состояния соприкасающихся поверхностей (гладкая, шероховатая), скорости катящегося тела и других факторов.

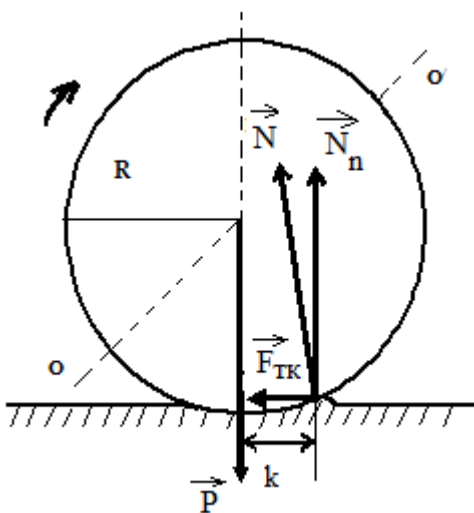


Рис. 6.1. Движение тела по плоской поверхности

В данной лабораторной работе коэффициент трения качения будем определять методом наклонного маятника, представляющий собой металлический шарик, подвешенный на нити длиной L , опирающийся на плоскость, которую можно устанавливать под разными углами β к основанию. На рисунке 6.2 представлена схема установки. Наклонный маятник представляет собой призматическую опору, на которой крепится

нить с шаром, трение которого о плоскую поверхность изучается (шар при этом касается плоскости). Угол β наклона плоскости можно изменять с помощью специального винта в верхней части стойки. Сила нормального давления шарика на плоскость (рис.6.3) (вид сбоку рисунка 6.2) равна

$$P = mg \cdot \cos \beta, \quad (6.4)$$

где m – масса шарика,

g – ускорение свободного падения,

β – угол наклона плоскости

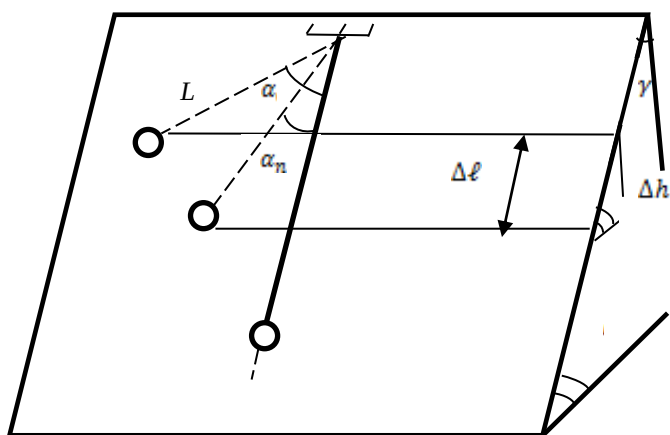


Рис.6.2. Схема установки

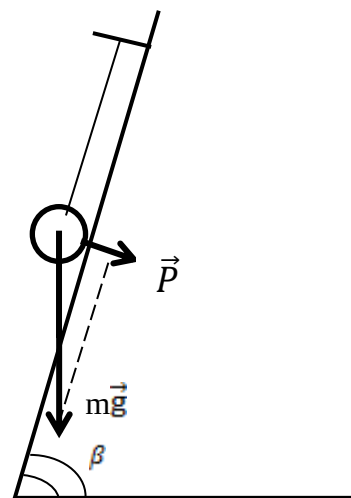


Рис. 6.3. Сила нормального давления

Отклонив шарик от положения равновесия (при натянутой нити) на некоторый угол α_0 (рис. 6.2) и отпустив его, он начнёт перекачиваться по наклонной плоскости, совершая затухающие колебания, обусловленные трением качения, при этом механическая энергия маятника уменьшается, т.к. совершается работа против сил трения. В точках поворота (маятник отклонён на максимальный угол от положения равновесия) потенциальная энергия – максимальна, а кинетическая энергия - равна нулю. С течением времени потенциальная энергия маятника уменьшится из-за трения качения.

Максимальный угол отклонения уменьшился от α_0 до α_n за n совершённых колебаний, тогда потери потенциальной энергии $\Delta W_{\text{п}}$ равны работе по преодолению сил трения качения:

$$A_{\text{тк}} = \Delta W_{\text{п}} = mg \cdot \Delta h, \quad (6.5)$$

где Δh – изменение высоты центра масс шарика.

По построению (рис.6.2) определим высоту, на которую поднялся шарик

$$\Delta h = \Delta \ell \cdot \sin \beta, \quad (6.6)$$

$$\Delta \ell = L \cdot (\cos \alpha_n - \cos \alpha_0). \quad (6.7)$$

Учитывая (6.6), (6.5), (6.7), получим

$$\Delta W_{\text{п}} = mg \cdot L \cdot (\cos \alpha_n - \cos \alpha_0) \cdot \sin \beta. \quad (6.8)$$

Тогда, работа, совершаемая против сил трения:

$$A_{\text{тк}} = F_{\text{тк}} \cdot S, \quad (6.9)$$

где S – путь, пройденный шариком за n колебаний, при условии, что затухание невелико, будет справедливо приближённое выражение

$$S = 4 L \cdot n \cdot \langle \alpha \rangle \approx 4 L \cdot n \cdot \frac{\alpha_0 + \alpha_n}{2}. \text{ И формула (6.9) примет вид с}$$

учётом (6.3), (6.4)

$$A_{\text{тк}} \approx \frac{4k \cdot mg \cdot L \cdot n}{R} \cdot \frac{(\alpha_0 + \alpha_n)}{2} \cdot \cos \beta. \quad (6.10)$$

Сравним (6.5), (6.8), (6.10), получим

$$k \approx \frac{R}{2n} \cdot \frac{\cos \alpha_n - \cos \alpha_0}{\alpha_0 + \alpha_n} \cdot \operatorname{tg} \beta.$$

Учитывая, что $\cos \alpha \approx 1 - \frac{\alpha^2}{2}$ и углы отклонения маятника небольшие,

коэффициент трения качения будем вычислять по формуле

$$k \approx R \cdot \frac{\alpha_0 - \alpha_n}{4n} \cdot \operatorname{tg} \beta. \quad (6.11)$$

В данной лабораторной работе при заданных значениях числа колебаний n , угле наклона β , угле отклонения маятника от положения равновесия α_0 предстоит измерить значение максимального угла отклонения маятника α_n за промежуток времени после совершения маятником n полных колебаний для определения коэффициента трения качения k .

Порядок выполнения работы

1. Для чистоты эксперимента протереть поверхность шарика и плоскость чистой тканью.
2. Получить задание у преподавателя (число колебаний n (3–10 колебаний), угол наклона β (углы в диапазоне $40^\circ - 60^\circ$), определить угол $\gamma = 90^\circ - \beta$, причём угол наклона γ отсчитывается от вертикального положения плоскости, а угол наклона β , входящий в расчётную формулу (6.11), – от горизонтального (см. рис. 6. 2).
3. Записать данные в таблицу.
4. Определить цену деления измерительной шкалы (шкалы углов α), указанной на установке (c).
5. Отклонить шарик от положения равновесия на угол $\alpha_0 = 5^\circ - 10^\circ$ и отпустить его без толчка и после n колебаний определить по шкале значение угла максимального отклонения α_n маятника
6. Повторить п. 5, уменьшая его на 1 градус, отклоняя маятник в оба крайних положения.
7. Для каждого угла α_0 вычислить среднее значение угла α_n .
8. Вычислить значение коэффициента трения качения k по формуле (6.11) для каждого угла α_0 . Радиус шарика $R = 0,01$ м.
9. Результаты измерений и вычислений занести в таблицу.

$\beta = \dots$ (град); $c = \dots$

Таблица 6.1

	n_i	α_0 , град	α_0 , рад	α_n , град	α_n , рад	k_i , м	Δk_i	$(\Delta k_i)^2$
1								
2								
3								
...					$\langle \alpha_n \rangle =$	$\langle k \rangle =$		
1								
2								
3								
...					$\langle \alpha_n \rangle =$	$\langle k \rangle =$		

Контрольные вопросы

1. Как возникает трение качения? Какие виды трения вам известны?
2. В каких точках кинетическая энергия шарика максимальна?
3. От чего зависит значение коэффициента трения качения? В каких единицах измеряется?
4. Почему у транспорта, предназначенного для движения по неровным дорогам, колёса имеют большой радиус?
5. От чего зависит сила трения качения?
6. Сформулируйте и запишите закон Кулона.

Лабораторная работа 7

Определение ускорения свободного падения тел на примере математического маятника

Цель работы: определить ускорение свободного падения тел для географической широты данной местности.

Приборы и принадлежности: математический маятник, секундомер, масштабная линейка.

Краткая теория

Ускорение свободного падения можно рассчитать по эмпирической (приближённой формуле, полученной из экспериментальных данных) формуле, зная географические координаты точки и высоту над уровнем моря. Г. Благовещенск : $50^{\circ}15'$ с.ш., $127^{\circ}33'$ в.д., высота над уровнем моря 137м.

$$g = 9,780327 \cdot (1 + 0,0053024 \sin^2 \varphi - 0,0000058 \sin^2 2\varphi) - 3,086 \cdot 10^{-6} h.$$

На любое тело, расположенное вблизи поверхности Земли, действует сила тяготения $\vec{F}$, под влиянием которой тело движется с ускорением свободного падения g . В согласии со вторым законом Ньютона в системе отсчёта, связанной с Землёй, на всякое тело m действует сила, которая называется силой тяжести $\vec{P} = m\vec{g}$.

Согласно обобщённому закону Галилея все тела в одном и том же поле тяготения падают с одинаковым ускорением. Следовательно, в данном месте Земли ускорение свободного падения одинаково для всех тел, оно изменяется

вблизи поверхности Земли с широтой φ в пределах от $9,78 \text{ м/с}^2$ на экваторе до $9,832 \text{ м/с}^2$ на полюсах. Это обусловлено суточным вращением Земли вокруг своей оси с одной стороны, и сплюснутостью Земли – с другой.

Так как различие значений g невелико, ускорение свободного падения принимается равным $9,81 \text{ м/с}^2$. Если пренебречь суточным вращением Земли вокруг своей оси, то сила тяжести и сила гравитационного тяготения равны между собой

$$P = mg = F = G \frac{m \cdot M}{R^2}, \quad (7.1)$$

где M – масса Земли;

$$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Нм}^2}{\text{кг}^2} \text{ – гравитационная постоянная;}$$

R – расстояние между телом m и центром Земли.

Из (7.1) ускорение свободного падения равно

$$g = G \frac{M}{R^2} = G \frac{M}{(R_0 + h)^2}, \quad (7.2)$$

где R_0 – радиус Земли;

h – высота тела над поверхностью Земли.

Из уравнения (7.2) следует, что с удалением тела от поверхности Земли сила тяжести P и ускорение свободного падения g уменьшаются.

Метод определения ускорения свободного падения с помощью математического маятника основан на зависимости периода T его колебания от ускорения g свободного падения.

Математический маятник – это система, состоящая из материальной точки массой m , подвешенной на невесомой нерастяжимой нити, и колеблющаяся под действием силы тяжести (рис.7.1).

Хорошим приближением математического маятника является небольшой тяжёлый шарик, подвешенный на тонкой длинной нити.

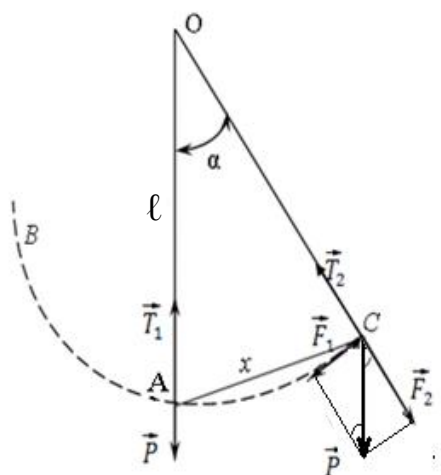


Рис.7.1. Схема
математического маятника

В положении равновесия (точка А на рис.7.1) сила тяжести материальной точки

$$\vec{P} = m \vec{g}$$

полностью уравнивается силой натяжения нити $\vec{T}_1$, и маятник остаётся в покое. При отклонении маятника в точку С на угол α удобно силу тяжести разложить на две составляющие: нормальную $\vec{F}_2$ и тангенциальную $\vec{F}_1$. Составляющая сила тяжести $\vec{F}_2$ уравнивается натяжением нити $\vec{T}_2$. Сила $\vec{F}_1$ всегда будет направлена противоположно смещению $x = AC$

и равна
$$F_1 = -P \cdot \sin \alpha . \quad (7.3)$$

Для малых углов ($5-6^\circ$) $\sin \alpha = \alpha$ (в радианах), и уравнение (7.3) запишется в

виде
$$F_1 = -P \alpha = -mg \alpha = -\frac{mg}{\ell} x. \quad (7.4)$$

Обозначив $\frac{mg}{\ell} = \text{const} = k$, получим
$$F_1 = -kx. \quad (7.5)$$

Из выражения (7.5) видно, что возвращающая сила F_1 аналогична по своему действию на маятник упругой силе, поэтому её и называют квазиупругой (упруго подобной). Из теории гармонических колебаний

известно, что
$$k = m \cdot \omega^2 = m \cdot \left(\frac{2\pi}{T} \right)^2 ,$$

где ω - циклическая частота колебаний;

T - период колебаний гармонических колебаний.

Сила, вызывающая колебания, равна

$$F = -kx = m \omega^2 x = -m \left(\frac{2\pi}{T} \right)^2 x,$$

откуда
$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\ell}{g}}. \quad (7.6)$$

Из уравнения (7.6) выразим g ,
$$g = \frac{4\pi^2 \ell}{T^2}. \quad (7.7)$$

Маятник, применяемый в работе, представляет собой массивный шарик небольшого радиуса, подвешенный на перекладине между двумя стойками на длинной двойной нити для того, чтобы колебания происходили в одной плоскости. На одной из стоек нанесена шкала. Второй перекладиной является передвижная линейка, с помощью которой можно определить расстояние от точек подвеса шарика до его центра ($\ell_{1пр}$, $\ell_{2пр}$). Расстояние от точки подвеса О маятника до его центра качания будет являться приведённой длиной маятника. Центр качания лежит ниже центра тяжести маятника. Непосредственно определить приведённую длину маятника сложно, поэтому поступают следующим образом: подводят подвижную линейку до соприкосновения с шариком и измеряют длин $\ell_1 = \ell_{1пр} + r$ и

$$\ell_2 = \ell_{2пр} + r, \quad \text{где } r - \text{ радиус шарика, тогда } \ell_{1пр} = \ell_1 - r \text{ и } \ell_{2пр} = \ell_2 - r,$$

$$T_1^2 = 4\pi^2 \frac{\ell_{1пр}}{g} = 4\pi^2 \frac{\ell_1 - r}{g}, \quad T_2^2 = 4\pi^2 \frac{\ell_{2пр}}{g} = 4\pi^2 \frac{\ell_2 - r}{g},$$

$$T_1^2 - T_2^2 = \frac{4\pi^2(\ell_1 - \ell_2)}{g}.$$

Отсюда
$$g = \frac{4\pi^2(\ell_1 - \ell_2)}{T_1^2 - T_2^2}. \quad (7.8)$$

Подставляя $T_i = \frac{t_i}{n_i}$ в (7.8), получим расчётную формулу для g

$$g_i = \frac{4\pi^2(\ell_1 - \ell_2) \cdot n_i^2}{t_{1i}^2 - t_{2i}^2}. \quad (7.9)$$

Выбранный метод измерения исключает необходимость нахождения центра качания.

Выполнение работы

1. Установить длину маятника ℓ_1 .
2. Отклонить маятник от положения равновесия на небольшой угол ($5^\circ - 6^\circ$),

отпустить шарик, предоставив ему возможность свободно колебаться. В момент наибольшего отклонения маятника запустить секундомер и измерить время t_{1i} , в течение которого маятник совершает n_{1i} колебаний. Измерение времени провести не менее трёх раз для различного числа колебаний (30-80).

3. Затем установить новую длину маятника ℓ_2 .
4. Для новой длины ℓ_2 измерить время t_{2i} , колебаний n_{2i} способом, указанным в пункте 2.
5. Пользуясь формулой (7.9), вычислить g .
6. Результаты измерений и вычислений занести в таблицу 7.1.

Таблица 7.1

ℓ , м		n_{1i}	t_{1i} , с	T_{1i} , с	$g_i, \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$	Δg_i	$(\Delta g_i)^2$
$\ell_1 =$	1				< g > = ...		$\sum (\Delta g_i)^2 = \dots$
	2						
	...						
$\ell_2 =$		n_{2i}	t_{2i} , с	T_{2i} , с			
	1						
	2						
	...						

7. Полученный результат сравнить с табличным результатом, сделать вывод.

Контрольные вопросы.

1. Что называют математическим маятником? Физическим маятником?
2. Что называется приведённой длиной физического маятника?
3. Записать формулы периода колебаний математического и физического маятников.
4. Что называется свободным падением тел?
5. Что называется возвращающей силой и как она направлена?
6. От каких величин зависит и от каких не зависит ускорение свободного падения?

Лабораторная работа 8

Определение коэффициента вязкости жидкости методом Стокса

Цель работы: изучить явление внутреннего трения в жидкостях и газах и определить динамический коэффициент вязкости жидкости.

Приборы и принадлежности: стеклянные цилиндры с

исследуемыми жидкостями, шарики из сплава Вуда или свинцовая дробь, микрометр, секундомер, термометр.

Краткая теория

В неравновесных изолированных системах процессы протекают так, что конечным их результатом всегда будет установление термодинамического равновесия. В установлении термодинамического равновесия важную роль играют диффузия, вязкость и теплопроводность, которые относятся к явлениям переноса. *Явлениями переноса* называются процессы, при которых происходит перенос энергии, импульса и массы вещества, обусловленные тепловым движением молекул при наличии градиентов температуры, скорости и концентрации. В данной работе изучается вязкость (внутреннее трение) жидкости при ламинарном течении. Вязкость (внутреннее трение) – это свойство реальных жидкостей оказывать сопротивление перемещению одной части жидкости относительно другой. Силы внутреннего трения, возникающие при перемещении одних слоёв реальной жидкости относительно других, направлены по касательной к поверхности слоёв. При этом со стороны слоя, движущегося быстрее, действует ускоряющая сила, а со стороны слоя движущегося медленнее, на слой, движущийся быстрее, действует тормозящая сила. Сила внутреннего трения F зависит от того, насколько быстро меняется скорость течения жидкости при переходе от слоя к слою (рис. 8.1).

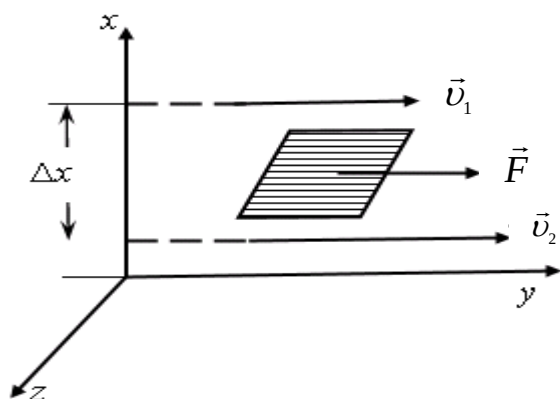


Рис. 8.1. Схема перемещения слоёв жидкости

На рисунке представлены два слоя, отстоящие друг от друга на расстоянии Δx и движущиеся со скоростями v_1 и v_2 . Направление, в котором отсчитывается расстояние между слоями, перпендикулярно скорости течения слоёв. Величина

$$\frac{\Delta v}{\Delta x} \text{ - показывает, как быстро}$$

меняется скорость при переходе от слоя к слою в направлении x , перпендикулярном направлению движения слоёв и называется градиентом скорости. Сила внутреннего трения определяется формулой Ньютона

$$F = -\eta \frac{dv}{dx} S, \quad (8.1)$$

где η – динамическая вязкость;

$\frac{dv}{dx}$ – градиент скорости;

S – площадь соприкосновения слоёв.

Взаимодействие двух слоёв согласно II закону Ньютона можно рассматривать как процесс, при котором от одного слоя к другому в единицу времени передаётся импульс, по модулю равный действующей силе, тогда выражение (8.1) можно представить в виде $j_p = -\eta \frac{dv}{dx}$, (8.1.1)

где j_p – плотность потока импульса – величина, определяемая полным импульсом, переносимым в единицу времени в положительном направлении оси x через единичную площадку, перпендикулярную оси x . Знак минус указывает, что импульс переносится в направлении убывания скорости.

Динамическая вязкость – это величина, численно равная силе внутреннего трения, приходящейся на единицу площади соприкосновения слоёв при единичном градиенте скорости. Единица вязкости – паскаль – секунда (Па · с).

Вязкость зависит от температуры, причём характер этой зависимости для жидкостей и газов различен (для жидкостей η с увеличением температуры уменьшается, у газов, наоборот, увеличивается), что указывает на различие в них механизмов внутреннего трения. Существуют два режима течения жидкостей (газов): ламинарный и турбулентный.

Ламинарным (слоистым) называется течение, если вдоль потока каждый выделенный тонкий слой скользит относительно соседних, не перемешиваясь с ними. Ламинарное течение жидкости наблюдается при небольших скоростях её движения. Слои, непосредственно соприкасающиеся со стенками трубки, вследствие молекулярного притяжения прилипают к ним и

не перемещаются. Все остальные слои движутся, и их скорость тем больше, чем больше расстояние слоёв от стенки трубки. Наибольшую скорость имеет слой газа (жидкости), движущейся по оси трубы. Скорость слоев по сечению канала при таком течении распределена по параболическому закону (рис. 8.2).

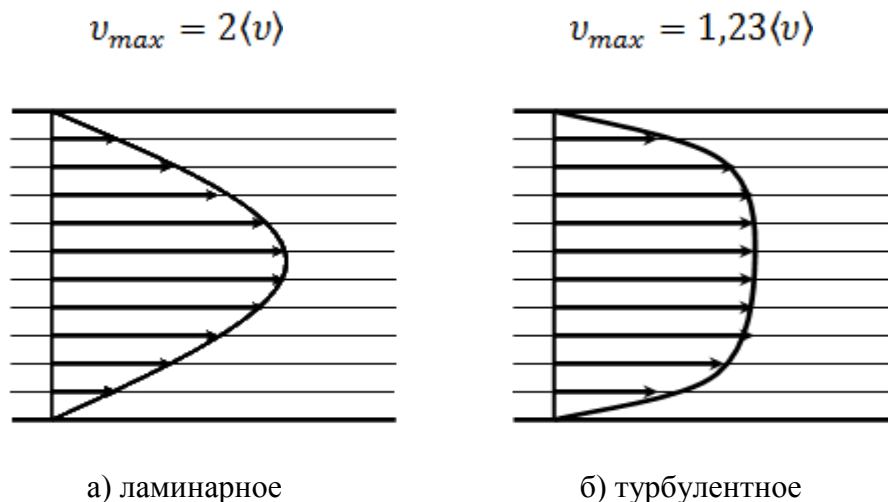


Рис. 8.2 Виды течения

Профиль усреднённой скорости при турбулентном течении в трубке (рис. 8.2 б) отличается от параболического профиля при ламинарном течении более быстрым возрастанием скорости у стенок трубки и меньшей кривизной в центральной части течения.

Характер течения зависит от безразмерной величины, называемой числом Рейнольдса (О. Рейнольдс – английский учёный)

$$Re = \frac{\rho \langle v \rangle d}{\eta} = \frac{\langle v \rangle d}{\nu} \quad (8.2)$$

где $\nu = \frac{\eta}{\rho}$ – кинематическая вязкость; (8.3)

ρ – плотность жидкости;

$\langle v \rangle$ – средняя скорость жидкости по сечению трубки;

d – диаметр трубки.

При $Re \leq 1000$ наблюдается ламинарное течение, при $1000 \leq Re \leq 2000$ – переход от ламинарного течения к турбулентному, а при $Re = 2300$ – течение турбулентное.

Важной характеристикой является текучесть ϕ жидкости или газа

$$\phi = \frac{1}{\eta} \quad (8.4)$$

Текучесть – свойство тел пластически или вязко деформироваться под действием механического напряжения. У газов, жидкостей текучесть обусловлена явлением диффузии молекул преимущественно в направлении действия напряжения.

В технике явление текучести наблюдается при движении газов и жидкостей по трубам, при изготовлении штамповочных изделий и т.д.

Экспериментально динамический коэффициент вязкости определяют по методу Стокса, основанному на движении шарика в вязкой жидкости. Для сравнения движение шарика будем наблюдать в двух разных жидкостях (глицерин и масло). На небольшой шарик, падающий вертикально в цилиндре с жидкостью, действуют три силы (рис. 8.3).

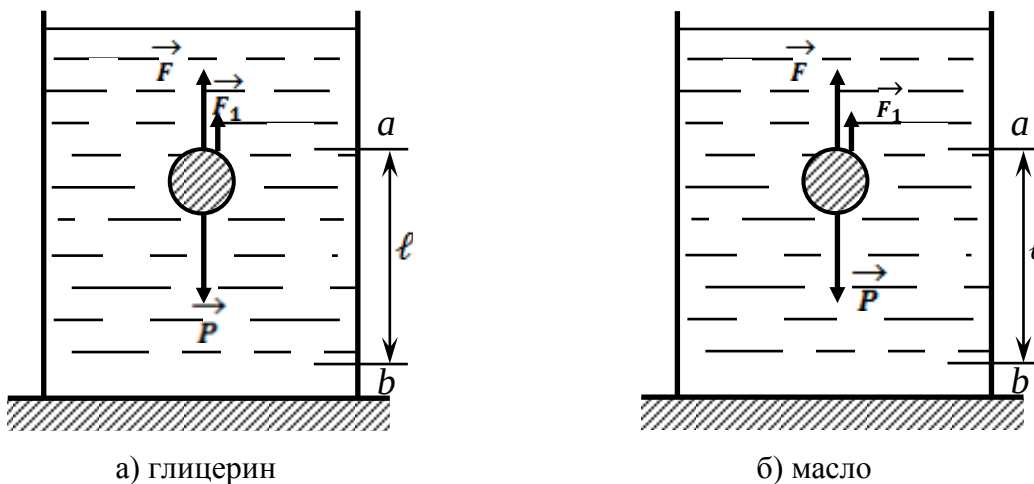


Рис. 8.3. Установка для определения вязкости

1. Сила тяжести $P = mg = \frac{1}{6}\pi d^3 \rho_1 g$, направленная вертикально вниз, где d – диаметр шарика, ρ_1 плотность вещества, из которого сделан шарик.

2. Сила Архимеда F_1 , действующая на шарик, погруженный в жидкость, выталкивающая его вверх и численно равная весу жидкости, вытесненной шариком, $F_1 = \frac{1}{6}\pi d^3 \rho_2 g$, где ρ_2 – плотность жидкости.

3. Сила внутреннего трения. Стокс установил, что сила сопротивления при движении шарообразных тел в жидкости или газе, прямо пропорциональна коэффициенту вязкости жидкости η , величине радиуса r или d и скорости движения v шарика (закон Стокса)

$$F = 6\pi\eta r \cdot v = 3\pi d\eta v.$$

Под действием этих трёх сил шарик будет двигаться прямолинейно. Согласно второму закону Ньютона уравнение движения шарика имеет вид

$$m \frac{dv}{dt} = P - F_1 - F.$$

При движении шарика силы P и F_1 все время остаются постоянными, а сила F возрастает по мере увеличения скорости. В некоторый момент силы F и F_1 , уравновесят направленную вниз силу P

$$P = F + F_1, \quad \text{то есть} \quad P - F - F_1 = 0 \quad (8.5)$$

При этом $m \frac{dv}{dt} = 0$ и $\frac{dv}{dt} = 0$, то есть шарик начинает двигаться равномерно.

Подставив в уравнение (8.5) значения сил, получим

$$^{1/6}\pi d^3 \rho_1 g - ^{1/6}\pi d^3 \rho_2 g - 3\pi d\eta v = 0.$$

Из этого равенства определим коэффициент вязкости жидкости

$$\eta = \frac{(\rho_1 - \rho_2)gd^2}{18 \cdot v}. \quad (8.6)$$

Скорость равномерного движения шарика в исследуемых жидкостях

$$\text{определяется} \quad v = \frac{\ell}{t}, \quad (8.7)$$

где ℓ – путь, пройденный шариком;

t – время падения шарика.

$$\text{Подставим (8.7) в (8.6). Получим} \quad \eta = \frac{(\rho_1 - \rho_2) \cdot g \cdot d^2 \cdot t}{18\ell}. \quad (8.8)$$

Формула (8.8) является не совсем точной, так как при её выводе не учтено то обстоятельство, что шарик, падая вниз, вытесняет жидкость. Вследствие этого создаётся поток жидкости вверх и возникает дополнительная сила. С учётом этой силы формула (8.8) для цилиндрического сосуда принимает вид

$$\eta_i = \frac{d_i^2 g t_i (\rho_1 - \rho_{2i})}{18 \ell \left(1 + 2,4 \frac{d_i}{D_i} \right)}, \quad (8.9)$$

где D – диаметр сосуда.

Формулой (8.9) пользуются, если соотношение $\frac{d}{D} < \frac{1}{10}$.

Выполнение работы

1. Измерить микрометром диаметр d_i шариков.
2. На обоих сосудах установить метку a на расстоянии 5 – 8 см ниже уровня жидкости, метку b на расстоянии 5 – 10 см от дна сосудов. Измерить расстояние ℓ между метками.
3. Опустить шарик в жидкость (плотность ρ_{21}), ориентируясь на ось цилиндра. В момент прохождения метки a шариком включить секундомер и определить время прохождения шариком расстояния ℓ в первом сосуде.
4. Опыт повторить для другого сосуда с жидкостью (плотность ρ_{22}).
5. Измерить диаметр D_1 и D_2 цилиндров с жидкостями и выбрать расчётную формулу для определения η_1 и η_2 соответственно.
6. Данные записать в таблицу 8.1.

Таблица 8.1

$n = \dots, T = \dots, D_1 = \dots, D_2 = \dots, \rho_1 = \dots, \rho_{21} = \dots, \rho_{22} = \dots, g = \dots, \ell_1 = \dots, \ell_2 = \dots$

7. По ф о	$\langle \varphi_1 \rangle = \dots$	$\langle \varphi_2 \rangle = \dots$	$\langle t_{1,c} \rangle = \dots$	$\langle t_{2,c} \rangle = \dots$	$\eta_{1i} = \dots$	$\eta_{2i} = \dots$	$\Delta \eta_{1i} = \dots$	$\Delta \eta_{2i} = \dots$	$(\Delta \eta_{1i})^2 = \dots$	$(\Delta \eta_{2i})^2 = \dots$
	1									
	2									
	·									
	·				$\langle \eta_1 \rangle$	$\langle \eta_2 \rangle$			$\sum (\Delta \eta_{1i})^2 =$	$\sum (\Delta \eta_{2i})^2 =$

формуле (8.3) вычислить кинематическую вязкость каждой жидкости.

8. Используя формулу (8.2) и учитывая, что $\langle v \rangle = \frac{v_1 + v_2}{2}$, вычислить среднее значение числа Рейнольдса и сделать вывод о характере движения.

Контрольные вопросы

1. В чем состоит явление вязкости в жидкости и газах?
2. От чего зависит сила внутреннего трения между слоями жидкости? Записать уравнение Ньютона.
3. Какой физической смысл динамического коэффициента вязкости? В каких единицах измеряется этот коэффициент в СИ?
4. Как изменяется коэффициент вязкости при изменении температуры? Почему?
5. Записать и сформулировать закон Стокса.
6. Вывести расчётную формулу динамического коэффициента вязкости, используемую в данной работе.
7. Дать понятие ламинарного и турбулентного течений.
8. Число Рейнольдса и использование его для определения характера движения газа и жидкости.

Лабораторная работа 9

Определение коэффициента теплопроводности материала

Цель работы: ознакомиться с явлением теплопроводности в жидких и твёрдых телах и определить коэффициент теплопроводности предлагаемого образца.

Приборы и принадлежности: установка для определения коэффициента теплопроводности, исследуемый образец, термометр, штангенциркуль, весы, электроплитка и секундомер.

Краткая теория

Явление теплопроводности заключается в направленном переносе энергии и возникает тогда, когда различные части среды имеют различную температуру, то есть обладают различной внутренней энергией.

При явлении теплопроводности процесс передачи теплоты **не сопровождается переносом вещества**. Так как температура – это мера кинетической энергии молекул, то различие температур двух участков тела свидетельствует о том, что кинетическая энергия молекул в этих участках различна.

Вследствие теплового движения молекулы из более нагретого слоя вещества перемещаются в слой, менее нагретый, а молекулы из менее нагретого слоя – в слой, более нагретый. При этом энергия более нагретого слоя уменьшается, а менее нагретого слоя – увеличивается. **Происходит односторонний процесс передачи тепла от более нагретой части тела к менее нагретой (а не наоборот)**, то есть процесс теплопроводности приводит в конечном итоге к выравниванию температуры по всему объёму тела.

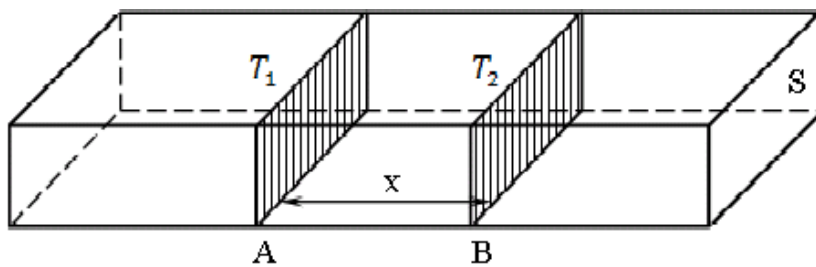


Рис. 9.1. Схема передачи тепла

Если процесс стационарный и температура меняется от слоя к слою равномерно, то количество теплоты, передаваемое через слой вещества толщиной x за время $d\tau$ (рис. 9.1), выражается зависимостью, называемой уравнением Фурье

$$dQ = -\chi \frac{T_1 - T_2}{x} S d\tau, \quad (9.1)$$

где $T_1 - T_2$ разность температур между сечениями А и В;

S - площадь поперечного сечения тела;

$\frac{T_1 - T_2}{x}$ – градиент температуры.

Градиент температуры показывает изменение температуры на единицу длины в направлении передачи теплоты. Скорость распространения тепла зависит от природы тела. В газах теплопроводность очень мала, а в жидкостях – несколько больше. Если говорить о твёрдых телах, то надо

различать два вида твёрдых тел проводники и диэлектрики. Теплопроводность диэлектриков очень мала по сравнению с теплопроводностью проводников. Это объясняется тем, что главную роль в теплопроводности металлов играют электроны. Электроны обладают огромной подвижностью, поэтому теплопроводность металлов значительно выше теплопроводности других тел.

Коэффициент пропорциональности χ носит название коэффициента теплопроводности. Если $S = 1 \text{ м}^2$, $\frac{T_1 - T_2}{x} = -1 \frac{\text{К}}{\text{м}}$, $\tau = 1 \text{ с}$, то $Q = \chi$, где *коэффициент теплопроводности численно равен количеству теплоты, проходящему через единичную площадку в 1 м^2 , перпендикулярную потоку теплоты, за единицу времени 1 с при градиенте температуры, равном -1 К/м .*

Если количество теплоты передаётся от более нагретой среды, температура которой поддерживается постоянной ($T_n = \text{const}$), к менее нагретой через перегородку толщиной x , то температура второй среды будет повышаться. В случае отсутствия теплопередачи со стороны второй среды количество теплоты, прошедшее через перегородку, можно определить калориметрическим путём по формуле

$$dQ = c m dT, \quad (9.2)$$

где c – удельная теплоёмкость второй среды;

m – масса второй среды.

Сравнивая (9.1) и (9.2), можно записать $c m dT = \frac{S}{x} \chi (T_n - T_i) d\tau$,

Откуда
$$c \cdot m \cdot x \cdot \frac{dT}{T_n - T_i} = \chi \cdot S \cdot d\tau. \quad (9.3)$$

Если за время τ температура второй среды изменилась от T_0 до T , то можно записать

$$c m x \int_{T_0}^T \frac{dT}{T_n - T_i} = \chi S \int_0^\tau d\tau \quad \text{или} \quad c m x \ln \frac{T - T_0}{T_n - T_i} = \chi S \tau,$$

откуда

$$\chi = \frac{c \cdot m \cdot x}{S} \cdot \frac{1}{\tau} \ln \frac{T_n - T_0}{T_n - T_i}, \quad (9.4)$$

или

$$\chi = \frac{c \cdot m \cdot x}{S} \cdot \frac{2,3}{\tau} \lg \frac{T_H - T_0}{T_H - T_i}, \quad (9.4')$$

так как для любого числа a $\lg a = 2,3 \lg a$.

Общий вид установки представлен на рисунке 9.2.

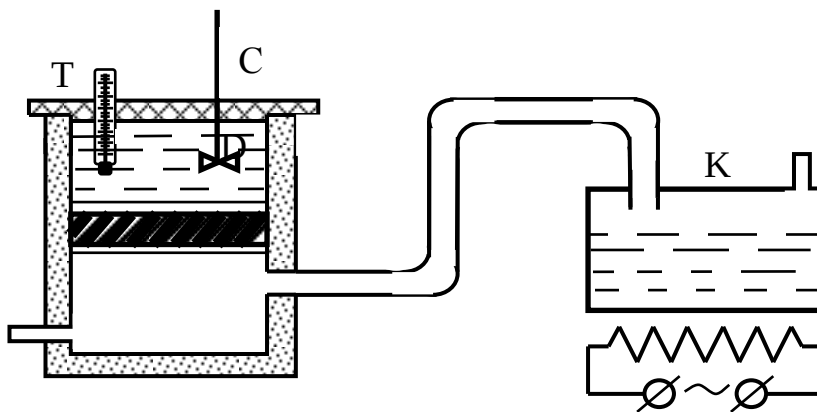


Рис. 9.2. Схема установки по теплопроводности

Пар от сосуда с кипящей водой К через трубку непрерывно поступает в сосуд С, благодаря чему температура стенок сосуда остаётся постоянной примерно $T_H = 373K$.

На дно сосуда С кладётся диск из исследуемого вещества, сверху которого устанавливается сосуд Д с водой. Изменение температуры фиксируется с помощью термометра Т, зная толщину x и площадь S исследуемого вещества, температуру воды до нагревания и через время τ , нетрудно определить коэффициент теплопроводности χ , если c_1, m_1 – удельная теплоёмкость и масса воды, c_2, m_2 – удельная теплоёмкость и масса пустого сосуда Д (алюминий). Формула (9.4') примет вид

$$\chi = \frac{2,3 (c_1 m_1 + c_2 m_2) \cdot x}{S \tau} \lg \frac{T_H - T_0}{T_H - T_i}. \quad (9.5)$$

Выполнение работы

1. Наполнить сосуд водой, поставить на плитку, включённую в сеть и соединить с сосудом С.
2. Измерить толщину x и диаметр d исследуемого образца и положить образец на дно сосуда С.

3. Определить площадь сечения образца по формуле

$$S = \frac{\pi d^2}{4}.$$

4. Определить массу m_2 внутреннего сосуда калориметра D .

5. Наполнить внутренний сосуд калориметра и определить массу его и воды вместе m .

6. Определить массу воды $m_1 = m - m_2$.

7. Поставить калориметр на исследуемый образец и закрыть установку крышкой.

8. После закипания воды, измерить и записать температуру T_0 воды в калориметре. Одновременно засечь время по часам.

9. В интервале времени 30 – 40 минут записать несколько раз по указанию преподавателя температуру воды. В процессе всех измерений воду необходимо непрерывно перемешивать мешалкой.

10. По формуле (9.5) вычислить χ и доверительный интервал методом прямых измерений.

11. Данные измерений и вычислений записать в таблицу 9.1.

Таблица 9.1

$T_0, K \dots, m_1, \text{кг} \dots, m_2, \text{кг} \dots, \chi, \text{М} \dots, d, \text{м} \dots, S, \text{м}^2 \dots,$						
	τ_i, c	$t_i, ^\circ C$	T_i, K	$\chi_i, \frac{\text{Вт}}{\text{К} \cdot \text{м}}$	$\Delta \chi_i$	$(\Delta \chi_i)^2$
1						
2						
3						
...				$\langle \chi \rangle = \dots$		$\sum (\Delta \chi_i)^2 = \dots$

12. Пользуясь справочной литературой, сравнить полученный результат с табличным значением коэффициента теплопроводности для данного вещества, а также по указанию преподавателя сравнить с коэффициентом теплопроводности других веществ и объяснить их различие в зависимости от природы этих веществ.

Контрольные вопросы

1. Объясните процесс теплопроводности с точки зрения молекулярно-кинетической теории.
2. Назовите способы передачи теплоты, отличные от теплопроводности.

3. Запишите уравнение Фурье.
4. Что называется градиентом температуры? В каких единицах он измеряется?
5. Какой физический смысл имеет коэффициент теплопроводности? В каких единицах он измеряется в СИ? От чего он зависит?
6. Для чего при измерениях необходимо непрерывно перемешивать жидкость в сосуде калориметра?
7. Вывести и объяснить формулу (9.5).

Лабораторная работа 10

Определение влажности воздуха

Цель работы: научиться пользоваться психрометром и с его помощью определить абсолютную и относительную влажности воздуха.

Приборы и принадлежности: психрометр, психрометрические таблицы, барометр - aneroid, дистиллированная вода, пипетка.

Краткая теория

Атмосфера состоит из смеси нескольких газов, называемой воздухом, в котором находятся во взвешенном состоянии жидкие и твёрдые частицы. В состав воздуха входят газы: азот (78%), кислород (21%), в небольшом количестве углекислый газ, аргон, водород, гелий, криптон, неон, ксенон, озон, радон, йод, метан. В состав воздуха входит также водяной пар, количество которого определяет влажность воздуха. Содержание водяного пара в атмосфере объясняется испарением воды с поверхностей рек, озёр, морей, переносом паров в горизонтальном и вертикальном направлениях.

Влажность воздуха является одной из существенных характеристик погоды и климата. Например, при низкой влажности, высокой температуре и значительной скорости ветра возникает комплексное метеорологическое явление – суховей. Высокая температура, низкая влажность и малое количество осадков составляют явление засухи. И засухи, и суховеи являются неблагоприятными метеорологическими условиями, при которых

тормозится развитие растений, ухудшается состояние и условия питания животных.

Высокая влажность задерживает цветение растений, наступление полной зрелости зерна. Влажность воздуха влияет на поведение насекомых. В тёплое время избыток влаги в атмосфере создаёт благоприятные условия для развития насекомых, бактериальных заболеваний.

Влажность воздуха влияет на терморегуляцию животных. Величина влажности учитывается при некоторых технологических процессах, лечении ряда болезней, хранении книг, произведений искусства.

Влажность воздуха имеет большое значение для жизнедеятельности организма человека, скорость испарения воды (пота) с поверхности зависит от относительной влажности воздуха. Испарение воды с поверхности альвеол в лёгких зависит от абсолютной влажности, так как из лёгких выдыхается воздух почти полностью насыщаемым паром при температуре 30 °С. Наиболее благоприятным для жизни человека считается атмосферный воздух влажностью 40-60%.

Воздух состоит из смеси газов и паров, давление этой смеси называется *атмосферным давлением*. Давление одного из газов или пара называется *парциальным давлением*. Парциальное давление водяного пара называется *упругостью пара*. В 1801 году Дальтон установил, что *давление газовой смеси равно сумме парциальных давлений входящих в неё газов*.

Применим этот закон для воздуха

$$p_{\text{возд}} = p_{\text{O}_2} + p_{\text{N}_2} + p_{\text{H}_2\text{O}} + \dots,$$

где $p_{\text{H}_2\text{O}}$ - парциальное давление или упругость водяного пара;

$p_{\text{O}_2}, p_{\text{N}_2}, \dots$ - давление кислорода, азота и других газов.

В СИ давление измеряется в паскалях (Па). 1 Па = 7,5·10⁻³ мм. рт. ст. допущен к употреблению 1 мм. рт. ст.

Процессы испарения и конденсации водяного пара идут одновременно. Если преобладает первый из них, то количество жидкости убывает, если же преобладает второй процесс, то имеет место обратная картина. Если число молекул, покидающих жидкость за одну секунду, равно числу молекул,

возвращающих в неё за то же время из пара, то наступает *динамическое равновесие*: количество жидкости и пара остаётся неизменным. Пар, находящийся в равновесии с жидкостью, называется *насыщенным*, а парциальное давление насыщенного пара называется *максимальной упругостью*.

В зависимости от поставленной задачи для характеристики влажности воздуха применяются следующие величины:

1. Абсолютная влажность воздуха - масса водяного пара, содержащегося в 1 м^3 воздуха. В СИ абсолютная влажность измеряется в $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, допущена к употреблению единица г/м^3 .

Абсолютная влажность ρ связана с упругостью p водяного пара (парциальным давлением) уравнением Менделеева - Клапейрона

$$pV = \frac{m}{\mu} RT, \quad \text{откуда} \quad \frac{m}{V} = \frac{p\mu}{RT},$$

где m - масса водяного пара;

V – объём воздуха;

μ - молярная масса пара;

R - молярная газовая постоянная;

T – абсолютная температура, отсчитываемая по термодинамической шкале от абсолютного нуля. $T = 273 + t$, где t - температура по шкале Цельсия.

Но отношение $\frac{m}{V}$ называется *абсолютной влажностью*. Следовательно,

$$\rho = \frac{p\mu}{RT}. \quad (10.1)$$

Подставив в формулу (10.1) $\mu = 18 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$, $R = 8,32 \text{ Дж/К} \cdot \text{моль}$

и произведя вычисления, получим $\rho = 216,3 \cdot 10^{-5} \frac{p}{T}$. (10.2)

2. Относительная влажность - отношение абсолютной влажности к максимальной

$$B = \frac{\rho}{\rho_{\max}} 100\%. \quad (10.3)$$

В метеорологии абсолютная влажность оценивается по давлению водяного пара, выраженному в мм. рт. ст. При комнатной температуре ($T \approx 300$ К) давление водяного пара p (мм.рт.ст.) $\approx \rho$ (г/м³). Тогда относительную

влажность можно рассчитать по формуле
$$B = \frac{p}{p_{\max}} \cdot 100\% . \quad (10.3')$$

Относительная влажность воздуха выражается в процентах. Она показывает степень насыщения воздуха водяными парами, по ней можно судить о скорости испарения воды. Дефицит влажности воздуха, или недостаток насыщения Δp - разность между максимально возможной и при данной температуре абсолютной влажности
$$\Delta p = p_{\max} - p. \quad (10.4)$$

Величина дефицита влажности применяется как важный показатель засух и суховеев. Например, интенсивные суховеи наблюдаются в дни с высокими дефицитами влажности $\Delta p = 40$ мм рт. ст. при небольших скоростях ветра, в дни с дефицитом $\Delta p = 25$ мм рт. ст. при больших скоростях ветра (10 м/с и больше).

3. Точка росы - температура, которую имеет воздух, если охладить его изобарно (при постоянном давлении) до состояния насыщения находящегося в нем водяного пара. Важность этого показателя несомненна, ибо при температурах ниже точки росы происходит конденсация водяных паров с образованием туманов, облаков, осадков в жидкой и твёрдой фазе, на поверхности земли и предметов образуется роса, иней, изморозь.

4. Удельная влажность q - количество водяного пара, содержащегося в 1 кг влажного воздуха. Учёт удельной влажности находит применение при определении величин испарения с поверхности органов дыхания животных и при определении соответствующих затрат энергии. Запишем уравнение газового состояния для некоторого объёма воздуха и водяного пара, содержащегося в этом объёме.

$$p_v V = \frac{m_v}{\mu_v} RT . \quad (10.5)$$

$$p V = \frac{m}{\mu} RT , \quad (10.6)$$

где p_v , μ_v , m_v - давление, масса молярная, масса воздуха;

p, m, μ - парциальное давление, масса и молярная масса водяного пара;

V - объем воздуха и пара.

Поделив уравнение (10.5) на (10.6), определив отношение $\frac{m}{m_e}$, получим

$$q = \frac{m}{m_e} = \frac{p\mu}{p_e\mu_e}. \quad (10.7)$$

Отношение $\frac{m}{m_e} = q$ – удельная влажность.
$$q = \frac{p\mu}{p_e\mu_e}. \quad (10.8)$$

В этом уравнении, подставив $\mu = 18 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$, $\mu_e = 29 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$, получим

$$q = 0,622 \frac{p}{p_e} \left(\frac{\text{кг}}{\text{кг}} \right).$$

Если удельную влажность выразить в $\frac{\text{г}}{\text{кг}}$, то
$$q = 622 \frac{p}{p_e}. \quad (10.9)$$

Для определения влажности используются разные приборы: психометры, гигрометры, метеорологические спутники Земли с лазерными и радиометрическими приборами. В данной работе используется вентиляционный психрометр (психрометр аспирационный М-34) (рис. 10.1)

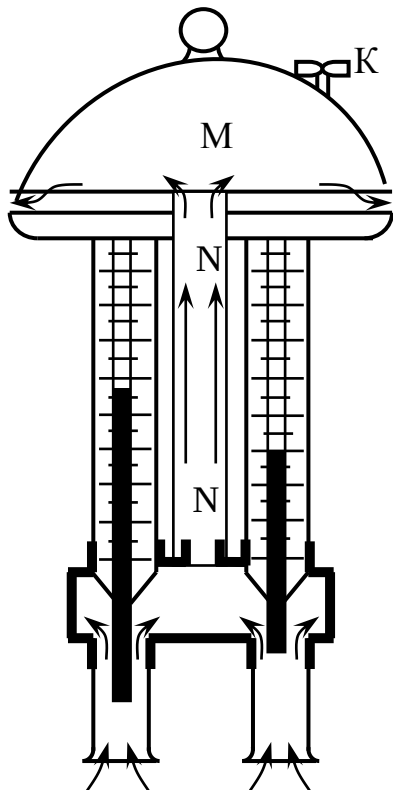


Рис. 10.1. Психрометр

Этот прибор состоит из двух термометров T_c и T_v , закреплённых в специальном держателе. Шарик термометра T_c находится в струе окружающего воздуха и термометр T_c измеряет его температуру. Шарик термометра T_v обернут тонким слоем батиста, увлажнённого водою. Вентилятор М, находящийся в верхней части прибора, создаёт равномерно восходящий поток воздуха по каналам, в которые помещены термометры. Влажный термометр охлаждается вследствие испарения воды с поверхности батиста. Понижение его температуры прекратится, когда приток тепла из окружающей

среды за промежуток времени $\Delta\tau$ будет равен расходу тепла, идущего на испарение воды с поверхности батиста за тот же промежуток времени.

$$\alpha (t_c - t_{\text{в}}) S \Delta\tau = k v \Delta\tau, \quad (10.10)$$

где α - коэффициент теплоотдачи, зависящий от рода поверхности тела и окружающей среды;

$(t_c - t_{\text{в}})$ - разность температуры сухого и влажного термометров;

S - площадь поверхности испарения;

k - коэффициент пропорциональности;

v - скорость испарения;

$\Delta\tau$ - промежуток времени.

Скорость испарения может быть найдена по формуле

$$v = \frac{k' S}{p_{\text{в}}} (p_1 - p), \quad (10.11)$$

где k' - коэффициент, зависящий от скорости протекающего воздуха;

$p_{\text{в}}$ - атмосферное давление;

p_1 - давление насыщенных паров при температуре $t_{\text{в}}$ испаряющейся воды;

p - абсолютная влажность воздуха p (упругость водяного пара).

Из (10.10) получаем

$$\alpha (t_c - t_{\text{в}}) S = \frac{k k' S}{p_{\text{в}}} (p_1 - p), \quad (10.12)$$

$$p_1 - p = \frac{\alpha (t_c - t_{\text{в}}) p_{\text{в}}}{k \cdot k'}. \quad (10.13)$$

где A - постоянная психометра и $A = 1 \cdot 10^{-4} \text{ К}^{-1}$ (указывается на приборе).

$$p = p_1 - A (t_c - t_{\text{в}}) p_{\text{в}} \quad (10.14)$$

Выполнение работы

1. Включить вентилятор и после установления температуры (достижения наименьших значений) отсчитать температуры t_c и $t_{\text{в}}$.
2. Из таблицы 10.1 “Давление насыщенных паров воды в мм рт. ст.” по температуре влажного термометра $t_{\text{в}}$ определить p_1 , а по температуре сухого

термометра t_c определить $p_{\max}$. Значения p_1 и $p_{\max}$ выразить в Па, учитывая, что 1 мм рт. ст. = 133 Па, и записать в таблицу 10.2.

3. Определить атмосферное давление p_v по барометру.
4. Определить p по формуле (10.14).
5. По формуле (10.3') определить относительную влажность B .
6. Опыт повторить n раз (по заданию преподавателя).
7. Результаты измерений занести в таблицу 10.2.

Таблица 10.1

Давление насыщенных паров воды в мм рт. ст.

$t^0 \text{C}$	$p_1, p_{\max}$	$t^0 \text{C}$	$p_1, p_{\max}$	$t^0 \text{C}$	$p_1, p_{\max}$	$t^0 \text{C}$	$p_1, p_{\max}$	$t^0 \text{C}$	$p_1, p_{\max}$
10,0	9,1	14,5	12,3	19,0	16,3	23,5	21,5	28,0	28,1
10,5	9,5	15,0	12,7	19,5	16,8	24,0	22,2	28,5	28,9
11,0	9,8	15,5	13,1	20,0	17,4	24,5	22,8	29,0	29,7
11,5	10,1	16,0	13,5	20,5	17,9	25,0	23,5	29,5	30,6
12,0	10,4	16,5	14,0	21,0	18,5	25,5	24,2	30,0	31,3
12,5	10,8	17,0	14,4	21,5	19,0	26,0	25,0	30,5	31,9
13,0	11,1	17,5	14,7	22,0	19,6	26,5	25,7		
13,5	11,5	18,0	14,9	22,5	20,2	27,0	26,5		
14,0	11,9	18,5	15,6	23,0	20,9	27,5	27,3		

1 мм рт. ст.=133 Па

Таблица 10.2

№ опыта	t_c	t_θ	Δt	$p_1, \text{Па}$	$p_{\max}, \text{Па}$	$p, \text{Па}$	$B_i\%$	ΔB_i	$(\Delta B_i)^2$
1									
2									
3									
...							$\langle B \rangle$		$\sum (\Delta B_i)^2$

8. По формуле (10.2) определите абсолютную влажность.
9. Пользуясь таблицей 10.1, по величине p определить точку росы t .
10. По формуле $\Delta p = p_{\max} - p$ вычислить дефицит влажности.
11. Вычислить удельную влажность по формуле (10.9).

Контрольные вопросы

1. Как совершается большой и малый цикл влагооборота на земном шаре?
2. Каков состав воздуха?

3. Что называется абсолютной, относительной влажностью и дефицитом влажности воздуха?
4. Напишите уравнение Менделеева - Клапейрона, в чем смысл каждой физической величины в данном уравнении?
5. В чем сущность закона Дальтона?
6. Как зависит парциальное давление пара от абсолютной влажности?
7. Что называется точкой росы, и какие явления наблюдаются при температуре ниже точки росы?
8. В чем смысл удельной влажности, и по какой формуле её определяют?
9. В чем сущность суховея?
10. Как определяется абсолютная (термодинамическая) температура?
11. Рассчитать, сколько влаги содержится в 1000 кг воздуха. Удельная влажность $q = 10$ г/кг (Ответ: 10^4 г).
12. Вычислить относительную влажность воздуха, если упругость водяного пара $p = 20$ ГПа, давление насыщенного пара при этих же условиях $p_0 = 25$ ГПа (Ответ: 80%).

Лабораторная работа 11

Определение отношения удельных теплоёмкостей газа и расчёт изменения энтропии при различных процессах

Цель работы: определить отношение удельных теплоёмкостей воздуха (коэффициент Пуассона) методом адиабатического расширения.

Приборы и принадлежности: закрытый стеклянный баллон, манометр, насос.

Краткая теория

В данной лабораторной работе экспериментально определяется постоянная адиабаты воздуха, а также рассчитывается изменение энтропии определённой массы воздуха при различных процессах и его молярная теплоёмкость в некоторых процессах.

Удельной теплоёмкостью газа называется физическая величина, численно равная количеству теплоты, которое необходимо сообщить

единице массы газа, чтобы увеличить её температуру на 1К в рассматриваемом термодинамическом процессе.

Единицей физической величины «удельная теплоёмкость» c в системе единиц СИ является $\frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{кг}}$. Величина удельной теплоёмкости газа

существенно зависит от того, при каких условиях он нагревается:

- при постоянном объёме ($V = \text{const}$ – изохорический процесс)
- при постоянном давлении ($p = \text{const}$ – изобарический процесс).

Помимо удельной теплоёмкости c вещества вводится молярная теплоёмкость C_M . Молярной теплоёмкостью называется количество теплоты, необходимое для нагрева моля вещества на 1К. Удельная теплоёмкость связана с молярной соотношением $C_M = M \cdot c$, где M – молярная масса вещества и измеряется в $\left(\frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{моль}} \right)$

В соответствии с этим у газа различают две теплоёмкости: теплоёмкость при постоянном объёме C_V и теплоёмкость при постоянном давлении C_p . Согласно первому началу термодинамики $\delta Q = dU + \delta A$, где, δQ - бесконечно малое количество теплоты, dU - бесконечно малое изменение внутренней энергии системы, δA – работа, совершаемая системой против внешних сил. Работа $\delta A = p \cdot dV$ при изменении объёма газа.

При *изохорном* процессе $A = 0$, так как объём не изменяется ($\Delta V = 0$). Очевидно, что при изохорическом процессе все сообщённое газу тепло затрачивается только на увеличение внутренней энергии газа $\delta Q = dU$.

При *изобарном* процессе ($p = \text{const}$) кроме тепла, идущего на увеличение внутренней энергии газа, требуется ещё дополнительное количество тепла на совершение работы расширения газа (так как неизменность давления обеспечивается увеличением объёма газа).

Следовательно, C_p всегда больше C_V ($C_p > C_V$). Непосредственное измерение C_p и особенно C_V экспериментально затруднительно, так как теплоёмкость газа составляет ничтожную долю теплоёмкости сосуда, заключающего газ, и поэтому измерение чрезвычайно неточно. Проще определить отношение величин C_p и C_V

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} . \quad (11.1)$$

Из кинетической теории газа следует, что отношение (11.1) зависит только от числа степеней свободы молекул, из которых состоит газ.

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} = \frac{i+2}{i} , \quad (11.2)$$

где i – число степеней свободы молекул (для одноатомного газа $i = 3$, для двухатомного $i = 5$, для многоатомного $i = 6$). То есть численное значение γ различно для одноатомных, двухатомных и многоатомных газов.

Величина γ является важной термодинамической характеристикой газа. Если для исследуемого газа найдена экспериментально величина γ , то можно вычислить i – число степеней свободы по формуле (11.2), тогда теплоёмкости его C_p и C_v могут быть определены по формулам $C_p = \frac{i+2}{i} \cdot R$, $C_v = \frac{i}{2} \cdot R$,

где R – молярная газовая постоянная. В настоящей работе определяется γ для воздуха (двухатомный газ). Метод определения γ , используемый в этой работе, основан на законе адиабатического расширения газа.

Адиабатическим называется процесс, проходящий в газе без теплообмена с окружающей средой. Зависимость между параметрами состояния газа при этом процессе выражается уравнением Пуассона

$$pV^\gamma = \text{const}, \quad (11.3)$$

где p – давление газа, V – объём газа,

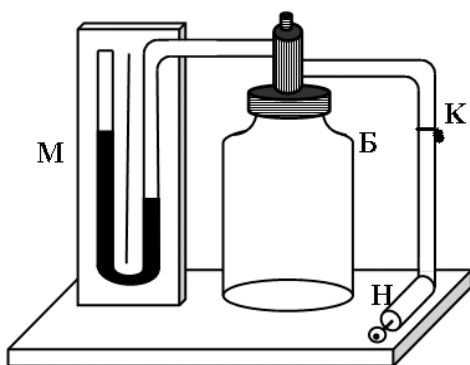


Рис.11.1 Схема установки

Экспериментальная установка состоит из стеклянного баллона Б, соединённого с манометром М и насосом Н (рис. 11.1). В стеклянный баллон при помощи насоса накачивают воздух. Давление и температура воздуха внутри баллона при этом повысятся. Вследствие теплообмена воздуха с

окружающей средой через некоторое время температура воздуха в баллоне сравняется с температурой внешней среды T_1 . Давление, установившееся в баллоне $p_1 = p + H$, где p – атмосферное

давление, H – добавочное давление, измеряемое разностью уровней жидкости в манометре. Это состояние, характеризуемое параметрами p_1 , V_1 , T_1 , соответствует началу эксперимента и на графике изображено точкой 1 (рис. 11.2). Быстрое расширение газа можно с достаточным приближением рассматривать как адиабатическое. Поэтому, открывая клапан на короткое время, в течение которого давление в баллоне достигает атмосферного, можно считать, что газ перейдёт в новое состояние, характеризуемое

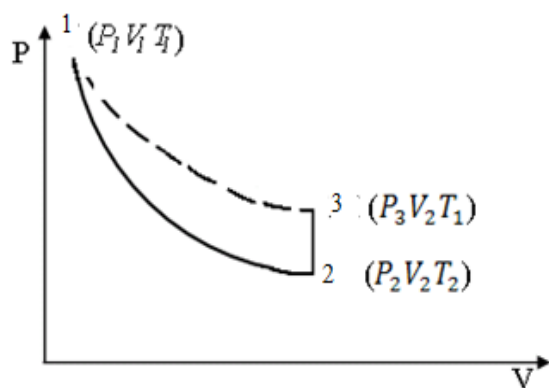


Рис. 11.2. График зависимости давления от объёма

параметрами p_2 , V_2 , T_2 (точка 2 на рисунке 11.2), в результате адиабатического процесса. Как известно, при адиабатическом расширении газа его температура понижается, то есть $T_2 < T_1$. При переходе газа из состояния 1 в состояние 2 его параметры связаны уравнением

$$p_1 V_1^\gamma = p_2 V_2^\gamma. \quad (11.4)$$

Через некоторое время в баллоне (закрытом в момент $p_2 = p$) газ нагревается до температуры окружающего воздуха T_1 . Поскольку при этом объём остаётся неизменным, то давление повысится до $p_3 = p + h$. Новое состояние газа характеризуется параметрами p_3 , V_2 , T_1 (точка 3 на рис. 11.2).

Так как в 1 и 3 состояниях воздух имеет одну и ту же температуру (процесс изотермический), то по закону Бойля-Мариотта

$$p_1 V_1 = p_3 V_2 \quad \text{или} \quad (p + H) V_1 = (p + h) V_2. \quad (11.5)$$

Из (11.5) можно записать

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{p + h}{p + H} \quad \text{или} \quad \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^\gamma = \left(\frac{p + h}{p + H} \right)^\gamma. \quad (11.6)$$

Пользуясь выражениями (11.4) и (11.5), имеем

$$\frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{p + h}{p + H} \right)^\gamma \quad \text{или} \quad \frac{p}{p + H} = \left(\frac{p + h}{p + H} \right)^\gamma \quad (11.7)$$

Логарифмируя выражения (11.7) и решая относительно γ , находим

$$\gamma = \frac{\lg(p+H) - \lg p}{\lg(p+H) - \lg(p+h)} . \quad (11.8)$$

Так как давления p , $(p+H)$, $(p+h)$ мало отличаются друг от друга, то разности логарифмов допустимо принять пропорциональными разностями самих давлений, то есть

$$\gamma = \frac{p+H-p}{p+H-p-h} \quad \text{или} \quad \gamma = \frac{H}{H-h} . \quad (11.9)$$

Формула (11.9) является расчётной для определения γ .

Клаузиус для описания поведения термодинамических систем ввёл функцию состояния, названную им энтропией. Если система получает от окружающих тел (или отдаёт им) тепло dQ , то её энтропия меняется на величину

$$dS = \frac{dQ}{T} \quad (11.10)$$

которое справедливо для равновесных процессов. Для неравновесных

процессов
$$dS > \frac{dQ}{T} \quad (11.11)$$

Адиабатический процесс является равновесным ($dQ=0$), согласно (11.10), $dS=0$, то есть энтропия не меняется (поэтому такой процесс называют также изоэнтропным). Энтропия возрастает при неравновесном процессе, согласно (11.11). Энтропия является функцией состояния, то есть её изменение не зависит от типа процесса, а однозначно определяется значениями макропараметров в начальном состоянии 1 и конечном состоянии 2:

$$\Delta S = \int_1^2 \frac{dQ}{T}$$

(интеграл можно брать по любому равновесному “пути”). Энтропия системы может быть выражена через любую пару параметров: (P,V) , (P,T) или (V,T) . Для идеального газа в переменных (P,V) и (P,T) энтропия определяется выражениями:

$$S(P,V) = \nu (C_v \ln P + C_p \ln V) + \text{const} \quad (11.12)$$

$$S(P,T) = \nu (C_p \ln T - R \ln P) + \text{const}' \quad (11.13)$$

(она определена с точностью до постоянного слагаемого) где ν - число молей газа, R - молярная газовая постоянная, C_v и C_p – молярные теплоёмкости при постоянном объёме и давлении, соответственно. В отличие от энтропии, теплоёмкость газов существенно зависит от типа процесса, то есть является функцией процесса, а не состояния. В разных процессах теплоёмкость может уменьшаться, увеличиваться, оставаться неизменной (принимать самые разные значения: быть положительной, отрицательной, бесконечно большой или же равной нулю). Если в течение всего процесса теплоёмкость газа неизменна, то такой процесс называют политропическим. Для идеального газа уравнение политропического процесса имеет вид:

$$PV^n = \text{const}, \quad (11.14)$$

где n - любое действительное число – называют показателем политропы. Молярная теплоёмкость газа C в политропическом процессе связана со значением n соотношением:

$$C = \frac{(n-\gamma)(C_p - C_v)}{(\gamma-1)(n-1)} \quad (11.15)$$

При адиабатическом равновесном процессе $C = 0$, и, как видно из (11.15), показатель политропы оказывается равным отношению C_p/C_v . Это отношение называют постоянной адиабаты и обозначают буквой γ . Уравнение равновесного адиабатического процесса для идеального газа (уравнение Пуассона):

$$P V^\gamma = \text{const} \quad (11.16)$$

Выполнение работы

1. Определение показателя адиабаты

1. Убедившись в том, что клапан в баллоне плотно закрыта, с помощью насоса накачивать воздух в баллон до тех пор, пока разность уровней жидкости в манометре не достигнет 300 – 400 мм. После прекращения накачивания воздуха в баллон перекрыть зажимом трубку, соединяющую баллон с насосом. Делается это для того, чтобы предупредить возможность выхода воздуха из баллона.

2. Когда давление воздуха в баллоне полностью установится, показателем чего является прекращение изменений уровней жидкости в коленях манометра, произвести по шкале отсчёт разности H уровней жидкости в манометре (параметры состояния газа V_1, T_1).

3. Быстро открыть клапан K и, как только уровни жидкости в манометре сравняются (состояние 2), закрыть её. Когда давление окончательно установится, производят второй отсчёт разности h уровней в манометре. Опыт повторить несколько раз, меняя величину H .

4. Подставляя в формулу (11.9) значения H и h , взятые из каждого отдельного опыта, вычислить γ . Все полученные результаты занести в таблицу.

$n = \dots$

Таблица 11.1

№ опыта	$H_i, м$	$h_i, м$	γ_i	$\Delta\gamma_i$	$(\Delta\gamma_i)^2$
1					
2					
3					
...			$\langle\gamma\rangle$		$\sum(\Delta\gamma_i)^2 = \dots$

5. Сравнить полученное γ с вычисленным по формуле (11.2). Вычислить удельные c_p и c_v .

2. Расчёт изменения энтропии воздуха при различных процессах

1. Используя выражение (11.12) для энтропии через параметры (P, V) , рассчитать изменение энтропии воздуха в баллоне ΔS_1 при изохорическом остывании его после окончания накачки до комнатной температуры. Для расчёта воспользуйтесь результатами любого из опытов первой части задания. Предварительно определите с помощью закона Менделеева-Клапейрона, сколько молей воздуха ν_1 находилось в баллоне после накачки (комнатная температура и атмосферное давление определяются по показаниям приборов в лаборатории). При расчётах ΔS следует учесть, что относительные изменения параметров малы, поэтому можно использовать формулы приближенных вычислений:

$$\ln(1+x) \approx x, \quad \frac{1}{1+x} \approx 1-x, \quad x \ll 1.$$

2. Рассчитайте изменение энтропии ΔS_2 первоначального количества газа ν_1 при его быстром расширении. Для расчёта воспользуйтесь результатами того же опыта, что и в предыдущем пункте. В этом случае удобнее использовать выражение (11.13) для энтропии через координаты (P, T) . Предварительно определите температуру T_2 в баллоне после окончания быстрого расширения (она легко вычисляется по данным последующего изохорического нагревания). Сравните полученное значение ΔS_2 с ожидаемым теоретическим значением. Получили бы мы ΔS_2 в точности равным нулю, если бы могли произвести расширение сколь угодно быстро?

3. Рассчитайте ΔS_2 при более медленном расширении по результатам одного - двух опытов при повторении задания 1. Увеличилась или уменьшилась энтропия при этом процессе? Объясните, почему. Как связаны быстрота процесса расширения и изменение энтропии при этом?

Контрольные вопросы

1. Какие термодинамические (газовые) процессы Вы знаете? Записать их уравнения и дать их графическое изображение. Привести примеры.
2. Записать и объяснить первое начало термодинамики для различных процессов.
3. Что называют теплоёмкостью газа? Удельной теплоёмкостью газа? Молярной теплоёмкостью? Объяснить физический смысл.
4. Каков физический смысл молярной газовой постоянной и постоянной Больцмана?
5. Дать определение энтропии, её физический смысл.
6. Увеличивается или уменьшается энтропия газа в процессах: изобарического расширения, изотермического расширения, изохорического охлаждения, адиабатического расширения в пустоту?

Лабораторная работа 12

Опытная проверка закона нормального распределения случайных величин (доска Гальтона)

Цель работы: проверка закона

Приборы и принадлежности: доска Гальтона, шарики одинаковой массы и размеров, воронка, штангенциркуль.

Краткая теория

Наиболее эффективным при изучении макроскопических систем, состоящих из большого числа частиц ($\sim 10^{20} - 10^{25}$), являются статистические методы. В данной лабораторной работе ставится задача – изучить некоторые



особенности распределения Гаусса на модели, представляющей собой доску Гальтона, шарики (пшено, зерно) (фотография доски Гальтона представлена). Случайными называются события, на исход которых влияет очень большое число неподдающихся контролю факторов. К такому типу явлений, например, относятся случайные погрешности (помимо них могут иметь место приборные и систематические погрешности), возникающие при измерении любой физической

величины. Наиболее распространённым законом распределения случайных величин является так называемый закон нормального распределения, или закон Гаусса. При нормальном распределении значения измеряемой величины сосредоточены, в основном, вблизи её среднего значения. Отклонения от среднего в сторону больших и меньших значений (x и $-x$) равновероятны, причём, с ростом модуля величины отклонения от среднего эта вероятность убывает, стремясь к нулю при $|x| \rightarrow \infty$.

Макросистемы (например, идеальный газ) состоят из большого числа частиц, поведение которых (каждой в отдельности) случайно. В случае идеального газа движение молекул хаотично, однако в целом макросистема подчиняется определённым закономерностям. Соотношение случайных событий и статистической закономерности можно рассмотреть на модельном опыте с доской Гальтона, которая приведена на рисунке 12.1. – это

вертикальная прозрачная панель. В верхней части панели в шахматном порядке горизонтально расположены гвоздики, а в нижней сделаны узкие вертикальные ячейки. Сверху в прибор вставлена воронка, в которой находятся одинаковые (по массе и размером) шарики, нижнее отверстие воронки закрыто заслонкой.

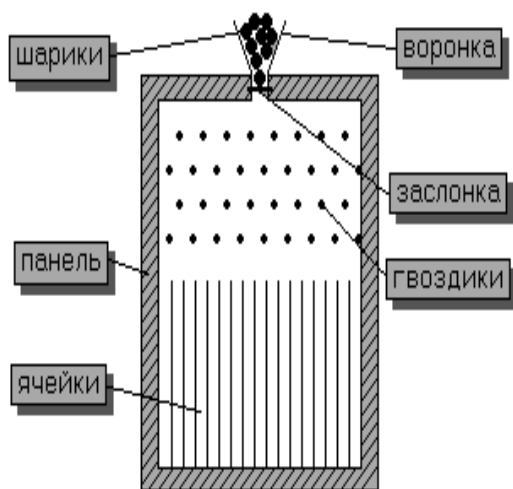


Рис. 12.1. Модель доски Гальтона

Если открыть заслонку, то шарики начнут падать, испытывая при этом столкновения с гвоздиками(стержнями). При этом поведение отдельного шарика – случайное событие и он может попасть в любую из ячеек. Однако для большого числа шариков (n – число падающих шариков) количественное распределение по ячейкам или вероятность попадания

данного шарика в отдельную ячейку подчиняется статистическому закону (рис. 12.2). Обозначим координату ячейки, лежащей напротив отверстия воронки за x_0 . Видно (рис.12. 2), что чаще всего шарики попадают в ячейки вблизи x_0 , и число их уменьшается по мере удаления от x_0 . Пусть падало n – шариков, тогда Δn – число шариков попадающих в интервал Δx . Вероятность (P) попадания шариков в интервал Δx определяется выражением

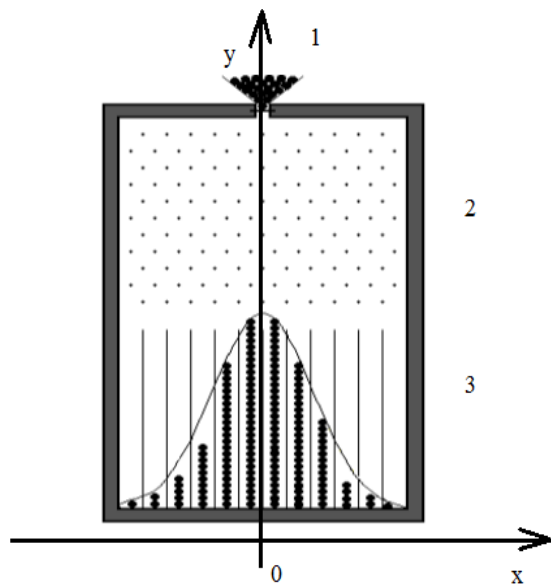


Рис. 12.2. Схема опыта после падения n – шариков

$$P = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\Delta n}{n} \quad (12.1)$$

Если x непрерывно, что возможно при уменьшении диаметров шариков и ширине ячейки, то существует вероятность dP попадания шариков в любой элементарный интервал dx . Ясно, что эта вероятность зависит в общем

случае от ширины интервала dx и от того, в окрестности какого значения x (номера ячейки) выбран этот интервал, т.е.

$$dP = f(x) dx \quad (12.2)$$

Функция $f(x)$ называется плотностью вероятности функции распределения случайной величины x . Явный вид этой функции был получен

К. Гауссом и имеет вид
$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{e^{-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma^2}}}{\sigma} \quad (12.3)$$

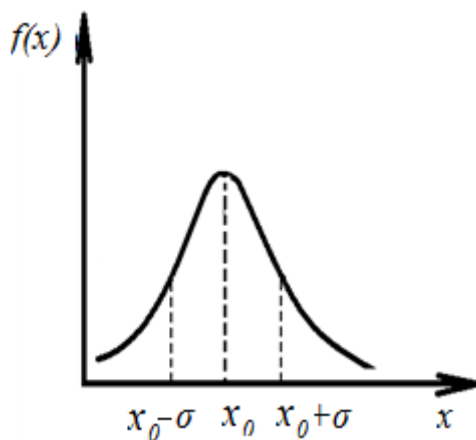
где x_0 - среднее значение (математическое ожидание) случайной величины; а σ – стандартным отклонением (стандартом), которое характеризует разброс случайной величины относительно среднего значения; в точке $x=x_0$ функция

достигает максимума вид $f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}$. Принять $(x - x_0) = x_i$. С

уменьшением σ кривая становится всё более и более островершинной. Изменение x_0 при постоянной σ не влияет на форму кривой, а лишь сдвигает её вдоль оси абсцисс. Площадь, заключённая под кривой, согласно условию

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx = 1 \quad \text{нормировки, равна единице.}$$

График этой функции представлен на рисунке 12.3. Параметр σ^2 – называется дисперсией распределения. Сравнивая результаты опыта, представленного на рисунке 12.2 и вид графика, изображённого на рисунке 12.3 можно заключить, что падение шариков (т.е. поведение в целом макросистемы) подчиняются закону Гаусса, который встречается настолько



получил название нормального закона распределения. В частности, одним из постулатов теории ошибок является утверждение о том результат измерения какой-либо физической величины является случайной величиной, распределённой по закону Гаусса.

12.3. График функции (12.3)

Распределение Гаусса справедливо в том случае, если случайная величина зависит от большого числа факторов, могущих вносить с равной

вероятностью положительные и отрицательные отклонения. Примером такого распределения может служить распределение случайных ошибок при измерениях, а также распределение молекул газа по проекциям скоростей v_x , (либо v_y , v_z). Основы классической статистической статистики, разработанные во второй половине XIX столетия, рассматривают макроскопические системы, состоящие из большого числа частиц ($\sim 10^{25}$). Статистика отвечает на два основных вопроса: а) как распределены частицы макросистем по координатам, скоростям, импульсам, энергиям и т.д.; б) как свойства таких систем связаны в условиях статистического равновесия с микрохарактеристиками частиц, составляющих данную макросистему.

В основе классической статистики лежат следующие положения:

1. Частицы, образующие макросистемы различимы, т.е. в принципе можно проследить за любой частицей.
2. Физические характеристики частиц (скорость, энергия и т.д.) могут изменяться непрерывно, т.е. принимать любые значения.
3. В тождественных состояниях может находиться любое число частиц, т.е. любое число частиц может иметь одну и ту же скорость, энергию и т.д.

Идеальный газ в условиях статистического равновесия, обусловленного хаотическим взаимодействием молекул друг с другом и со стенками сосуда при соударениях, может быть описан функцией распределения Максвелла (например, по скоростям)

$$F(v) = \frac{dn_v}{n dv} \quad (12.4)$$

где dn_v – число молекул в единице объёма газа, скорости, которых

лежат в интервале от v до $v+dv$;

n – концентрация молекул.

Функция распределения Максвелла показывает, какова вероятность того, что скорость данной молекулы имеет значение, заключённое в единичном интервале скоростей, включающем данную скорость v , или каково относительное число молекул, скорости которых лежат в этом

интервале. Величина

$$F(v)dv = \frac{dn_v}{n} \quad (12.5)$$

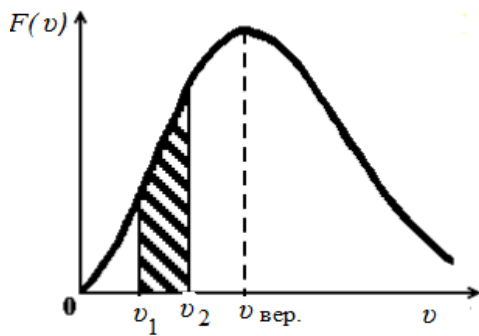
есть вероятность того, что скорость данной молекулы лежит в интервале от v до $v+dv$; или относительное число молекул, скорости которых заключены в этом интервале. Функция $F(v) = \frac{dn_v}{n dv}$ носит название функции

распределения Максвелла. Эта функция нормирована, т.е. $\int_0^{\infty} F(v) dv = 1$. (12.6)

Явный вид функции распределения молекул по скоростям был получен Д.К.

Максвеллом в 1859 г. Она имеет вид $F(v) = 4\pi \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot e^{-\frac{mv^2}{2kT}} \cdot v^2$, (12.7)

где m – масса молекулы;
 T – абсолютная температура;
 v – заданная скорость;



Распределение Максвелла справедливо для частиц любых классических систем газов, твёрдых тел, жидкостей. График этой функции распределения для некоторой температуры T приведён на рисунке 12.4.

Особенности этой функции таковы: при $v = 0$

Рис. 12.4. График функции для $F(v) = 0$ из-за множителя v^2 ; при $v = \infty$ $F(v) = 0$ некоторой температуры

из-за множителя $e^{-\frac{mv^2}{2kT}}$, что означает маловероятность весьма малых и очень больших скоростей молекул. Максимум кривой $F(v)$ приходится на значение $v_{вер}$ – наиболее вероятной скорости молекул (т.е. этой скоростью обладает наибольшее число молекул) при данной температуре. Значение $v_{вер}$ можно вычислить, если продифференцировать $F(v)$ по v и приравнять к нулю

полученное значение $\frac{\partial F(v)}{\partial v} = 0$. Запишем $F(v) = A e^{-\frac{mv^2}{2kT}} \cdot v^2$, (12.8)

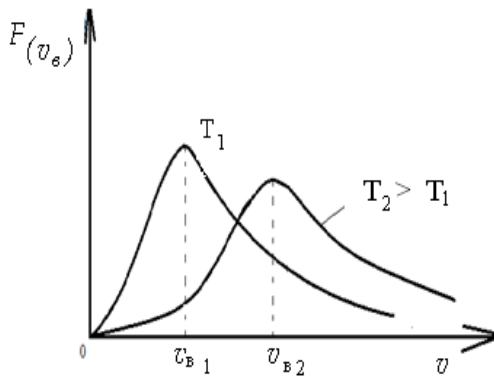
где $A = 4\pi \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{\frac{3}{2}}$ – величина, которая не зависит от v .

$$\frac{\partial F(v)}{\partial v} = A \left(\left(-\frac{mv}{kT} \right) \cdot v^2 \cdot e^{-\frac{mv^2}{2kT}} + e^{-\frac{mv^2}{2kT}} \cdot 2v \right) = A e^{-\frac{mv^2}{2kT}} \cdot v \left(2 - \frac{mv^2}{kT} \right) = 0. \quad (12.9)$$

$$\text{т.е.} \quad v_г = \sqrt{\frac{2kT}{m}}, \quad F(v_г) = \frac{4}{e} \sqrt{\frac{m}{2\pi kT}} \quad (12.10)$$

– максимальное значение функции распределения при данной температуре.

Кроме того можно вычислить v_B и $F(v_B)$ для двух температур T_1 и T_2 . Пусть $T_2 > T_1$. Из формул (12.9) и (12.10) следует, что v_B – возрастает, а $F(v_B)$ –



уменьшается, и это иллюстрируют графики на рис.12.5. Вероятность того, что скорость данной молекулы имеет одно из значений в пределах от v_1 до v_2 , равна площади заштрихованной полосы (см.

рис.12.4), то есть
$$\frac{\Delta n}{n} = \int_{v_1}^{v_2} F(v) dv \quad (12.11),$$

Рис. 12.5. Зависимость v от T

которое можно вычислить, подставив в выражение (12.11), явный вид $F(v)$ имеет вид (см. (12.7)). В данной работе изучение закона нормального распределения проводится на механической модели, воспроизводящей картину случайных отклонений частиц от их среднего положения в результате суммирования большого числа равновероятных элементарных отклонений. Установка (доска Гальтона) схематически изображена на рисунках 12.1,12.2. Сыпучий материал (пшено, зерно) из воронки (1) просыпается через ряд равномерно расположенных стержней (2), которые отклоняют частицы от вертикального направления. Рассеянные шарики собираются в прозрачном ящике с узкими ячейками (отсеками) (3). Высота уровня шариков в каждой ячейке пропорциональна относительной частоте отклонения частиц от их среднего положения.

Выберем систему координат, как показано на рисунке 12.2, совместив ось y с осью воронки. Тогда отклонение шариков от вертикали может быть задано координатой центра i -ой ячейки x_i , а число шариков, находящихся в ней, – величиной Δn_i . Если общее число ячеек нечётное, равное $2m+1$, то номер ячейки i пробегает значения от $-m$ до m , включая $i = 0$ (для него $x_0 = 0$, число шариков – Δn_0).

Важно: В экспериментальной установке ширина каждой ячейки Δx равна 1 см, поэтому для отклонений справедливо: $x_i = i$ см и $x_{-i} = -i$ см. (для нечётного числа ячеек)

Если в исследуемой установке имеется чётное число ячеек, равное $2m$ (отсутствует ячейка с $i = 0$), то начало координат удобно выбрать между ячейками с $i = -1$ и $i = 1$ (как на рис.12.2). В этом случае (учитывая, что $\Delta x = 1$ см), имеем: $x_i = (i - 0,5)$ см и $x_{-i} = (-i + 0,5)$ см.

На рисунке 12.4 заштрихованная площадь есть вероятность того, что отклонения от среднего значения окажется в интервале от v_1 до v_2 или

В данной работе нужно вычислить относительные частоты $\frac{\Delta n_i}{n}$ (см.

формулу 12.1), $n = \sum_{i=-m}^m \Delta n_i$ – общее число шариков, рассеянных стержнями

(гвоздиками), включая Δn_0 для $x_0 = 0$. Очевидно, что число шариков Δn_i в i -той ячейке (отсеке) пропорционально высоте h_i уровня шариков в нём, а

общее число $n = \sum_{i=-m}^m \Delta h_i$ уровней шариков во всех ячейках, следовательно,

$$\frac{\Delta n_i}{n} = \frac{\Delta n_i}{\sum_{i=-m}^m \Delta n_i} = \frac{h_i}{\sum_{i=-m}^m \Delta h_i} . \quad (12.12)$$

Для конечного числа измерений z , если z достаточно велико, выражение для дисперсии σ будет иметь вид

$$\sigma = \frac{\sum_{k=1}^z x_k^2}{m} \quad (12.13)$$

x_k – отклонение случайной величины от среднего значения при k -том измерении, формулу (12.13) можно записать в виде:

$$\sigma = \sum_{i=1}^m \left(\frac{h_i}{\sum_{i=1}^m h_i} \right) \cdot x_i^2 + \sum_{i=-1}^{-m} \left(\frac{h_i}{\sum_{i=-1}^{-m} h_i} \right) \cdot (x_{-i})^2 , \quad (12.14)$$

где i – номер ячейки;

m – общее число ячеек справа, $(-m)$ – общее число ячеек слева (рис.12.2);
 h_i – высота i -той ячейки;

$\sum_{i=1}^m h_i$ – сумма всех высот справа, $\sum_{i=-1}^{-m} h_i$ – сумма всех высот слева;

x_i – ширина ячейки справа, x_{-i} ширина ячейки слева (учесть чётность и нечётность).

$$A = \sum_{i=1}^m \left(\frac{h_i}{\sum_{i=1}^m h_i} \right) \cdot x_i^2 = \text{– слагаемое справа}; \quad B = \sum_{i=-1}^{-m} \left(\frac{h_i}{\sum_{i=-1}^{-m} h_i} \right) \cdot (x_{-i})^2 = \text{– слагаемое слева}$$

Формула (12.14) справедлива для любого числа ячеек (в случае нечётного их числа учтено, что $x_0=0$).

Порядок выполнения работы

1. Равномерно сыпать в воронку шарики из ёмкости через воронку до тех пор, пока центральные отсеки приёмника не заполнятся почти доверху.
2. Масштабной линейкой с миллиметровыми делениями измерить высоты h_i заполнения ячеек (отсеков) приёмника. Результаты записать в таблицу.
3. Произвести расчёты. Найти дисперсию σ по формуле (12.14).
4. Для каждого значения x_i рассчитать по формуле (12.3) значение $f(x)$.
5. Построить гистограмму $h_i (i)$
6. Построить график функции $f(x) (i)$.

Таблица 12.1

$i = 1, 2, 3, \dots, n - \text{const}, \quad n = \dots$

справа

слева

$x_i,$ m	x_i^2	$h_i,$ m	$\sum_{i=1}^m h_i$	A		$x_{-i},$ m	$(x_{-i})^2$	$h_i,$ m	$\sum_{i=-1}^{-m} h_i$	B	$\sigma,$ m^2

Контрольные вопросы

1. Основные положения классической статистики

2. Что характеризует дисперсия случайной величины? Постройте примерные графики функции нормального распределения для различных значений дисперсии.
3. При каком условии справедливо распределение Гаусса?
4. Записать формулу закона распределения молекул по скоростям.
5. Физический смысл функции распределения Максвелла.
6. Почему распределение отклонений шариков от средней вертикали, на доске Гальтона, можно считать близким к нормальному?

Лабораторная работа 13

Определение средней длины свободного пробега и эффективного диаметра молекул газа по явлению внутреннего трения

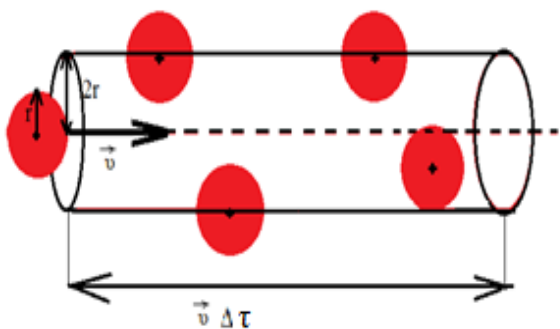
Цель работы: Познакомиться с явлением внутреннего трения в газах и основными газокинетическими характеристиками молекул. Экспериментально определить длину свободного пробега и эффективный диаметр молекул воздуха по явлению внутреннего трения.

Приборы и принадлежности: сосуд с краном (сосуд Мариотта), капилляр, стакан, манометр, термометр, барометр.

Краткая теория

В молекулярной физике мы часто имеем дело с такими физическими явлениями, как диффузия, теплопроводность, внутреннее трение. Теория этих явлений основана на понятиях *средней длины свободного пробега* и *эффективного диаметра молекул газа*. Средняя скорость молекул газа при комнатной температуре сравнима со скоростью оружейной пули. Это означает, что запах пахучего вещества должен распространяться мгновенно. Однако на практике это не наблюдается. Медленность диффузии немецкий физик теоретик Р. Клаузиус объяснил столкновением молекул. Молекула не всё время движется по прямой. Сталкиваясь с другими молекулами, она меняет направление движения, перемещаясь в результате по зигзагообразной траектории. *Молекула проходит путь x , между двумя последовательными соударениями который называется длиной свободного пробега* Длина свободного пробега величина случайная, молекуле удаётся пролететь между соударениями как большое расстояние, так и малое. Будем считать важным

кинематическим параметром является *среднее расстояние, проходимое молекулой между столкновениями, которое называется средней длиной свободного пробега*. Обозначим её λ . Тогда, что чем больше плотность газа и чем больше размеры молекул, тем короче средняя длина свободного пробега. Если бы частицы газа представляли материальные точки, они никогда бы не сталкивались друг с другом. Поэтому при рассмотрении столкновений молекул в газе, их представляют в виде твёрдых шаров некоторого радиуса r . Столкновения между молекулами происходят всякий раз, когда центры двух молекул окажутся на расстоянии не больше, чем $2r$ друг от друга. На рис. 13.1 изображён цилиндр радиусом $2r$. Штриховая прямая представляет собой путь, по которому следовала бы одна из молекул, если бы она не испытывала столкновений. Столкновение произойдёт, если центр другой молекулы окажется внутри этого цилиндра. Направление движения частицы изменится, как только произойдёт столкновение. Предположим, что данная молекула - одна из многих, движущихся в газе со скоростью v .



Если другие молекулы не движутся и, что концентрация молекул равна n , то число молекул, центры которых лежат внутри цилиндра, определится как концентрация n , умноженная на объём этого цилиндра. Обозначим число столкновений z . За промежуток времени Δt молекула пройдёт расстояние $v \cdot \Delta t$,

в этом случае, объём цилиндра равен $V = \pi (2r)^2 v \cdot \Delta t$. Тогда число столкновений z за время Δt равно $z = n \cdot \pi \cdot (2r)^2 v \cdot \Delta t$. Среднюю длину свободного пробега λ найдём

$$\lambda = \frac{v \cdot \Delta t}{n \cdot \pi (2r)^2 \cdot v \cdot \Delta t} \quad (13.1)$$

Если остальные молекулы неподвижны, то выражение (13.1) является не совсем точным. На самом деле они движутся, и число столкновений за время Δt должно зависеть от *относительной* скорости сталкивающихся молекул, а не от v . Тогда, число столкновений в секунду равно

$z = n \cdot \pi \cdot (2r)^2 \cdot v_{\text{отн}} \cdot \Delta\tau$, где $v_{\text{отн}}$ – средняя относительная скорость сталкивающихся молекул, n – концентрация молекул. Максвелл, используя функцию распределения молекул по скоростям, показал, что $\vec{v}_{\text{отн}} = \sqrt{2} \cdot \vec{v}$, тогда средняя длина свободного пробега в уравнении (13.1) принимает вид:

$$\lambda = \frac{1}{4\pi r^2 \cdot n\sqrt{2}} \quad (13.2)$$

Согласно уравнению (13.2), можно сделать вывод, что λ зависит от n газа. Применив основное уравнение молекулярно-кинетической теории идеального газа и запишем $n = p/kT$, то из выражения :

$$\lambda = \frac{1}{4\sqrt{2}\pi r^2} \cdot \frac{kT}{p}. \quad (13.3)$$

следует, что при постоянной температуре λ обратно пропорциональна давлению газа: $\lambda \sim 1/p$. Так, при давлении воздуха 133 Па , она имеет порядок 10^{-2} см , а при $1,33 \text{ Па}$ она в 100 раз больше. Молекулы газа, находясь в тепловом движении, непрерывно сталкиваются друг с другом. Расстояние между центрами молекул, или минимальное расстояние, на которое сближаются при столкновении центры двух молекул, называется эффективным диаметром молекулы d (рис.13.2). Эффективное сечение молекулы $\sigma = \pi d^2$ также является важной характеристикой при изучении кинематического движения частиц. Выражение (13.3) будет иметь вид:

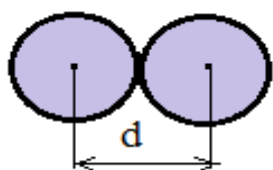


Рис. 13.2 Эффективный диаметр молекулы

$$\lambda = \frac{1}{\sigma\sqrt{2}} \cdot \frac{kT}{p}, \quad \text{откуда} \quad \sigma = \frac{1}{\lambda\sqrt{2}} \cdot \frac{kT}{p} \quad (13.4)$$

Эффективное сечение σ несколько уменьшается с повышением T . Объяснение этому было дано Сезерлендом : $\sigma = \sigma_0(1+C/T)$, где C – постоянная, называемая постоянной Сезерленда, имеет размерность T . При повышении температуры молекула несколько меньше времени находится в поле влияния другой молекулы и пролетает мимо неё без «захвата», что и приводит к увеличению длины свободного пробега молекул. Он использовал модель твёрдых шаров, но учёл силы притяжения, с которыми молекулы действуют друг на друга в промежутках между столкновениями.

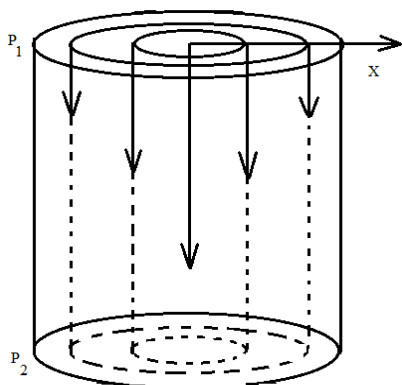


Рис. 13.3. Механизм возникновения вязкости

При различных процессах эффективное сечение у одних и тех же частиц может быть различным. В вакууме среднюю длину свободного пробега молекул можно не рассматривать. Используя явления внутреннего трения в газах или жидкостях, можно определить длину свободного пробега и эффективный диаметр молекулы. Схематично

газ протекает по трубе цилиндрического сечения.

Согласно МКТ газ состоит из молекул, молекулы образуют слои, которые движутся с различными скоростями: с наибольшей скоростью движется слой газа в средней части сосуда, а по мере приближения к стенкам скорость убывает, у самой стенки имеется слой газа с нулевой скоростью. (рис.13.3).

Следовательно, поперёк направления движения наблюдается градиент скорости движущихся слоёв газа. При перемещении молекул из более быстрого слоя в более медленный переносится импульс и скорость слоёв изменяется. Возникают силы внутреннего трения (вязкости) на границе раздела слоёв, которые направлены вдоль поверхности соприкасающихся слоёв. Тогда поток импульса через единицу площади ΔS границы раздела двух слоёв газа, определяется величиной градиента скорости $\frac{dv}{dx}$. По закону

Ньютона этот поток импульса Φ_p равен $\Phi_p = \frac{f_{\text{тр}}}{\Delta S} = -\eta \frac{dv}{dx}$, где η -

коэффициент внутреннего трения или динамической вязкости. Знак «-» означает, вектор градиента скорости и поток импульса направлены в противоположные стороны, а величина η , называемая коэффициентом внутреннего трения (динамической вязкости) определяется соотношением

$$\eta = \frac{1}{3} \cdot \langle \lambda \rangle \cdot \rho \cdot \langle \vec{v} \rangle, \quad (13.5)$$

где ρ – плотность газа,

$\langle \lambda \rangle$ - средняя длина свободного пробега молекул,

$\langle \vec{v} \rangle$ – средняя скорость молекул.

Единицей динамической вязкости в СИ является Па · с (Пуаз).

Физический смысл η : это вязкость такого газа, у которого при площади соприкосновения слоёв 1 м^2 при градиенте скорости 1 м/с возникает сила

внутреннего трения, равная 1 Н ($1 \text{ Пз} = 0,1 \text{ Н с/м}^2$). По коэффициенту внутреннего трения в газах определим газокINETические характеристики молекул воздуха: длину свободного пробега и эффективный диаметр. Течение, при котором различные слои газа текут, хотя и с разными скоростями, параллельно друг другу (ламинарное течение) справедлива формула Пуазейля.

Определим объём газа, протекающего при стационарном течении через

капилляр за время τ :

$$V = \frac{\pi \cdot r^2}{8 \cdot \eta \cdot \ell} \cdot \Delta p \cdot \tau , \quad (13.6)$$

где r – радиус капилляра;

ℓ - длина капилляра;

Δp – разность давлений на концах капилляра;

η - коэффициент вязкости воды.

Откуда следует выражение для коэффициента вязкости

$$\eta = \frac{\pi \cdot r^2}{8 \cdot V \cdot \ell} \cdot \Delta p \cdot \tau , \quad (13.7)$$

Применяя (13.5), можно определить среднее значение длины свободного

пробега, то есть

$$\lambda = \frac{3 \cdot \eta}{\rho} \sqrt{\frac{\pi \cdot \mu}{8 \cdot R \cdot T}} \quad \text{и} \quad \rho = \frac{p \cdot \mu}{R \cdot T}, \quad (13.8)$$

где p - - давление воздуха в помещении, определяемое по барометру;

T - температура воздуха по шкале Кельвина ;

μ - молярная масса воздуха.

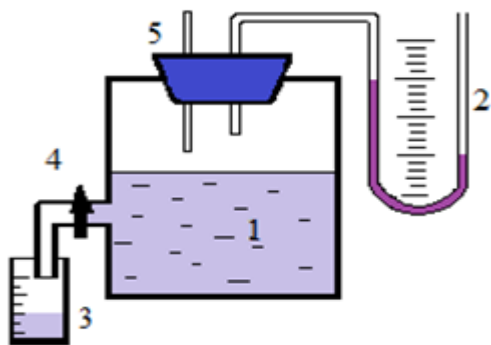


Рис. 13.4. Схема лабораторной установки

Эффективное сечение определим по формуле (13.4), а затем и эффективный диаметр молекул воздуха. Установка представлена на рисунке 13.4, состоит из сосуда (1) с краном (4), в верхней части которого находится пробка, манометра (2), мерного стакана (3). В пробку вставляется капилляр (5), через который протекает газ.

В данной работе изучаются газокINETические параметры воздуха, который

протекает именно через этот капилляр. Давление на концах капилляра измеряется манометром (2). Вследствие избыточного давления столба жидкости над открытым краном (4) вода начнёт вытекать из него непрерывной струёй в стакан (3), а давление воздуха в сосуде будет понижаться. Когда давление столба жидкости и воздуха в сосуде станет меньше атмосферного, вода начнёт вытекать каплями, а отрыв капли будет соответствовать моменту, когда давление столба жидкости и воздуха над ним на величину Δp станет больше атмосферного. Когда разность уровней жидкости в коленях манометра перестанет расти, то есть что на концах капилляра установится постоянная разность давлений $\Delta p = \rho g \Delta h$, процесс станет стационарным. Экспериментально определив скорость вытекания воды, зная длину, диаметр капилляра и можно рассчитать газокINETические параметры воздуха по формулам (13.4, 13.6, 13.7, 13.8).

Порядок выполнения работы

1. Подставить мерный стакан (3) (рис.13.4) к сосуду(1) с краном(4).
2. Открыть кран (4) и одновременно засечь время τ вытекания воды, вода должна стекать по стенкам, чтобы её уровень не колебался и дожидаться, когда установится стационарный процесс (вода начнёт вытекать каплями). Объём жидкости может составлять 10-100 см³ (по заданию преподавателя)
3. Когда на манометре установится постоянная разность уровней жидкости, оценить их разность в коленях манометра Δh_i . Рассчитать разность давлений на концах капилляра по разности уровней жидкости в манометре: $\Delta p_i = \rho_1 g \Delta h_i$, где ρ_1 - плотность воды при температуре опыта.
4. Вылить из стакана воду и повторить опыт несколько раз при другой скорости истечения воды. Для точного определения объёма жидкость рекомендуется взвесить. (Взвесить пустой стакан, затем с водой и определить разность масс Δm).
5. Записать температуру воздуха, атмосферное давление, плотность воды и воздуха при условиях эксперимента.

6. Вычислить скорость v_{cp} . скорость потока (среднюю по сечению капилляра): $\langle v \rangle = \frac{V}{\tau} \cdot \pi r^2$, где r – радиус капилляра; V – *объём воздуха, прошедшего через капилляр, равный объёму воды, вытекшей за время τ .*

7. Рассчитать значения η , λ , σ , по формулам (13.7, 13.8, 13.4). Опыт повторить несколько раз. Вычислить погрешности измерений при доверительной вероятности $\alpha = 0,9$.

8. Рассчитать число Рейнольдса по формуле $R_e = \frac{\rho_2 \cdot r \cdot \langle v \rangle}{\eta}$,

где ρ_2 – плотность воздуха в условиях опыта. Течение жидкости должно быть ламинарным.

9. Записать окончательные результаты измеряемых величин η , λ , σ , v_{cp} .

Таблица

$\Delta m = \dots$ кг, $\ell = \dots$ м, $t = \dots$ C⁰, $T = \dots$ К, $p = \dots$ Па, $g = \dots$ м/с²,
 ρ_1 (вода) = ... кг/м³, ρ_2 (воздух) = ... кг/м³, $r = \dots$ м.

	Δh , м	V , м ³	Δp , Па	τ , с	$\langle v \rangle$, м/с	η , Па·с	λ , м	σ , м ²
1								
2								
3								
...								

После проведённых измерений и расчётов, оценить величины погрешностей измерения при заданном значении надёжности α .

Контрольные вопросы

1. Что называется средней длины свободного пробега молекулы?
2. Какая величина называется эффективным сечением молекулы газа?
3. Как зависят эти величины от давления и температуры газа?
4. В каких единицах измеряется коэффициент вязкости?
5. Запишите закон Ньютона.
6. При каком условии происходит отрыв капель от крана? Играет ли при этом уровень воды в сосуде?

Индивидуальные задания по теории погрешности

1

1. Даны три значения измеряемой величины – диаметра проволоки d : $d_1 = 2,13 \text{ мм}$; $d_2 = 2,15 \text{ мм}$; $d_3 = 2,08 \text{ мм}$. Используя теорию погрешностей, сделать математическую обработку результатов, если $\alpha = 0,8$.
2. Что называется измерением физической величины?

2

1. При определении ускорения свободного падения получены следующие результаты: $g_1 = 9,68 \text{ м/с}^2$; $g_2 = 9,72 \text{ м/с}^2$; $g_3 = 10,12 \text{ м/с}^2$. Используя теорию погрешностей, сделать математическую обработку результатов, если $\alpha = 0,7$.
2. Что называется относительной погрешностью измерения?

3

1. При определении продольной упругости получены следующие результаты: $E_1 = 215,67 \text{ ГПа}$; $E_2 = 221,31 \text{ ГПа}$; $E_3 = 217,27 \text{ ГПа}$; $E_4 = 220,14 \text{ ГПа}$; $E_5 = 219,98 \text{ ГПа}$. Используя теорию погрешностей, сделать математическую обработку результатов, если $\alpha = 0,8$.
2. Какие виды измерений знаете? Дать понятие.

4

1. При измерении высоты детали получены следующие результаты: $h_1 = 2,15 \text{ мм}$; $h_2 = 2,25 \text{ мм}$; $h_3 = 2,10 \text{ мм}$; $h_4 = 2,20 \text{ мм}$. Используя теорию погрешностей, сделать математическую обработку результатов, если $\alpha = 0,7$.
2. Что называется абсолютной погрешностью измерения?

5

1. При измерении диаметра проволоки d получены результаты: $d_1 = 2,52 \text{ мм}$; $d_2 = 2,48 \text{ мм}$; $d_3 = 2,57 \text{ мм}$; $d_4 = 2,54 \text{ мм}$. Используя теорию погрешностей, сделать математическую обработку результатов, если $\alpha = 0,9$.
2. По какой формуле определяется средняя квадратичная погрешность?

6

1. При определении ускорения свободного падения получены следующие результаты: $g_1 = 9,15 \text{ м/с}^2$; $g_2 = 9,35 \text{ м/с}^2$; $g_3 = 9,89 \text{ м/с}^2$; $g_4 = 10,2 \text{ м/с}^2$; $g_5 =$

9,61 м/с². Используя теорию погрешностей, сделать математическую обработку результатов, если $\alpha = 0,8$.

2. Что называется доверительным интервалом?

7

1. При измерении периода колебаний маятника получены следующие результаты: $T_1 = 5,16$ с; $T_2 = 4,78$ с; $T_3 = 4,91$ с; $T_4 = 5,02$ с; $T_5 = 5,09$ с. Используя теорию погрешностей, сделать математическую обработку результатов, если $\alpha = 0,7$.

2. Какие бывают измерения?

8

1. При измерении периода колебаний маятника получены следующие результаты: $T_1 = 1,87$ с; $T_2 = 1,78$ с; $T_3 = 1,69$ с; $T_4 = 1,74$ с; $T_5 = 1,82$ с. Используя теорию погрешностей, сделать математическую обработку результатов, если $\alpha = 0,7$.

2. Какие виды ошибок различают в эксперименте? Привести примеры.

9

1. При измерении диаметра проволоки d получены результаты: $d_1 = 1,72$ мм; $d_2 = 1,65$ мм; $d_3 = 1,63$ мм; $d_4 = 1,69$ мм; $d_5 = 1,68$ мм. Используя теорию погрешностей, сделать математическую обработку результатов, если $\alpha = 0,7$.

2. Какие измерения называются косвенными? Привести примеры.

10

1. При определении ускорения свободного падения получены следующие результаты: $g_1 = 9,24$ м/с²; $g_2 = 9,38$ м/с²; $g_3 = 9,75$ м/с²; $g_4 = 9,94$ м/с². Используя теорию погрешностей, сделать математическую обработку результатов, если $\alpha = 0,9$.

2. Какие измерения называются прямыми? Привести примеры.

11

1. При измерении высоты детали получены следующие результаты: $h_1 = 21,47$ мм; $h_2 = 21,53$ мм; $h_3 = 21,55$ мм; $h_4 = 21,51$ мм. Используя теорию погрешностей, сделать математическую обработку результатов, если $\alpha = 0,8$.

2. Что называется относительной погрешностью измерения?

12

1. При определении ускорения свободного падения получены следующие результаты: $g_1 = 9,34 \text{ м/с}^2$; $g_2 = 9,38 \text{ м/с}^2$; $g_3 = 9,55 \text{ м/с}^2$; $g_4 = 9,61 \text{ м/с}^2$. Используя теорию погрешностей, сделать математическую обработку результатов, если $\alpha = 0,9$.

2. Какие измерения называются прямыми? Привести примеры.

13

1. При определении плотности твёрдого тела правильной геометрической формы получены следующие результаты: $\rho_1 = 120,8 \frac{\text{г}}{\text{мм}^3}$; $\rho_2 = 118,2 \frac{\text{г}}{\text{мм}^3}$; $\rho_3 = 119,4 \frac{\text{г}}{\text{мм}^3}$; $\rho_4 = 123,6 \frac{\text{г}}{\text{мм}^3}$; $\rho_5 = 122,2 \frac{\text{г}}{\text{мм}^3}$. Используя теорию погрешностей, сделать математическую обработку результатов, если $\alpha = 0,6$.

2. Что называется относительной погрешностью измерения?

14

1. При измерении периода колебаний маятника получены следующие результаты: $T_1 = 1,45 \text{ с}$; $T_2 = 1,38 \text{ с}$; $T_3 = 1,47 \text{ с}$; $T_4 = 1,32 \text{ с}$; $T_5 = 1,48 \text{ с}$; $T_6 = 1,35 \text{ с}$. Используя теорию погрешностей, сделать математическую обработку результатов, если $\alpha = 0,6$.

2. Что называется абсолютной погрешностью измерения?

15

1. При измерении высоты детали получены следующие результаты: $h_1 = 15,22 \text{ мм}$; $h_2 = 15,32 \text{ мм}$; $h_3 = 15,19 \text{ мм}$; $h_4 = 15,27 \text{ мм}$; $h_5 = 15,24 \text{ мм}$. Используя теорию погрешностей, сделать математическую обработку результатов, если $\alpha = 0,7$.

2. Что называется измерением физической величины?

ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ

Вариант 1

1. В каких единицах измеряется линейная скорость в СИ?

- а) $\frac{км}{ч}$; б) $\frac{см}{мин}$; в) $\frac{м}{с}$; г) $\frac{см}{ч}$; д) $\frac{рад}{с}$; е) нет вариантов.

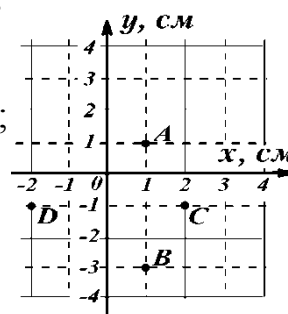
На рисунке представлена система координат. Определите, используя рисунок, изменение координат тела при его

перемещении из точки А в точку D. а) $\Delta x = -3$ см; $\Delta y = -2$ см;

б) $\Delta x = -3$ см; $\Delta y = 2$ см; в) $\Delta x = 3$ см; $\Delta y = -2$ см; г) $\Delta x = 3$

см; $\Delta y = 2$ см; д) $\Delta x = -2$ см; $\Delta y = -1$ см; е) нет верных

ответов.



3. Тело движется прямолинейно из состояния покоя с постоянным ускорением и за 10 с набирает скорость 20 м/с. Найдите абсолютную величину ускорения тела. а) $a = 1$ м/с²; б) $a = 2$ м/с²; в) $a = 200$ м/с²; г) $a = 0,2$ м/с²; д) $a = 2,2$ м/с²; е) среди ответов нет верных.

4. Тело движется по закону $S = 5 + 2t + 4t^2$.

Определить скорость тела через 1 с.

- а) 13 м/с; б) 10 м/с; в) 11 м/с г) 18 м/с.
д) 16 м/с; е) 14 м/с.

5. Момент инерции однородного диска массой m и радиуса R относительно оси, проходящей через его центр масс перпендикулярно

плоскости диска, равен $J = \frac{1}{2}mR^2$. Чему равен момент инерции диска

относительно оси, проходящей через его край и перпендикулярной плоскости

диска? а) mR^2 ; б) $2 mR^2$; в) $\frac{3}{2}(mR^2)$; г) $\frac{5}{2}(mR^2)$; д) $\frac{m(r^2 + R^2)}{2}$; е) $\frac{mR^2}{2}$

6. Тело движется равномерно и прямолинейно. Какое утверждение о равнодействующей всех приложенных к нему сил правильно, если система отсчета инерциальна?

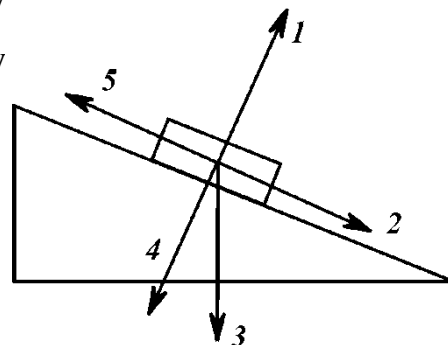
- а) не равна нулю, постоянна по модулю и направлению;
б) не равна нулю, постоянна по модулю, а не по направлению;

- в) не равна нулю, постоянна по направлению, но не по модулю;
 г) равна нулю; д) равна нулю или постоянна по модулю и направлению;
 е) нет верных утверждений.

7. Модуль равнодействующей всех сил, приложенных к телу массой 2 кг, равен 10 Н. Чему равна абсолютная величина скорости движения тела?

- а) $v = 0$ м/с; б) $v = 0.2$ м/с; в) $v = 5$ м/с; г) $v = 20$ м/с;
 д) абсолютная величина скорости может быть любой; е) нет верных.

8. Укажите среди векторов, приложенных к телу (см.рисунок), вектор, соответствующий весу тела.



- а) вектор 1; б) вектор 2;
 в) вектор 3; г) вектор 4;
 д) вектор 5; е) среди ответов нет верных.

9. Какое количество вещества содержится в теле, состоящем из $1,204 \cdot 10^{24}$ молекул? Число Авогадро $6,02 \cdot 10^{23}$ моль $^{-1}$.

- а) 1,5 моль; б) 2 моль; в) 2,5 моль; г) 3 моль; д) 3,5 моль;
 е) нет правильного ответа.

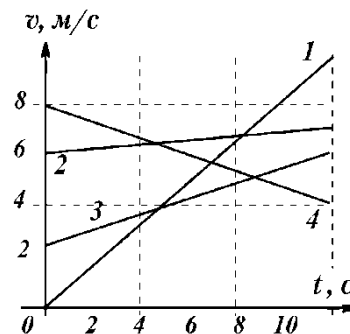
10. При какой температуре средняя квадратичная скорость молекул кислорода больше их наиболее вероятной скорости на 100 м/с.

- а) 405 К; б) 60 °С; в) 360 К; г) 381 К; д) 100 °С; е) 273 °С

Вариант 2

1. По графикам зависимости модулей скорости от времени (см. рисунок) определите, какое из тел прошло наибольший путь за первые 4 с, если все тела двигались прямолинейно.

- а) тело 1; б) тело 2; в) тело 3; г) тело 4;
 д) 1 и 4 тело прошли одинаковый путь;
 е) все тела прошли одинаковый путь.

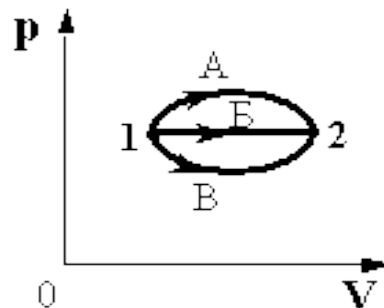


2. Чему равна угловая скорость?

- а) $\omega = \frac{d\rho}{dt}$; б) $\omega = \frac{d\varphi}{dt}$; в) $\omega = \frac{dv}{dt}$; г) $\omega = \frac{dS}{dt}$; д) $\omega = d\varphi \cdot dt$; е) нет верных.

3. Под действием постоянной силы 10 Н тело движется прямолинейно по закону $S=6-3t+t^2$. Найти массу тела. а) 1 кг; б) 5 кг; в) 3 кг; г) 6 кг; д) 2,5 кг; е) 4 кг.	
4. Если между направлением силы $\vec{F}$ и перемещением S угол α, то рассчитывать работу силы $\vec{F}$ следует по формуле а) $FS \sin \alpha$; б) $\frac{F}{S} \cos \alpha$; в) $\frac{F}{S} \sin \alpha$; г) $FS \cos \alpha$; д) $Fv \cos \alpha$; е) нет правильного ответа.	
5. Тело совершает гармонические синусоидальные колебания с периодом 4,8 с и нулевой начальной фазой. Через сколько времени после начала колебаний смещение тела от положения равновесия станет равным половине амплитуды? а) 0,2 с; б) 0,6 с; в) 0,4 с; г) 1,2 с; д) 0,3 с; е) 0,8 с.	
6. Какова полная кинетическая энергия поступательного движения 2 моль идеального газа при температуре 27 °С? а) 13226 Дж; б) 5800 Дж; в) 2748 Дж; г) 6400 Дж; д) 7479 Дж; е) затрудняюсь ответить.	
7. В природе невозможен такой циклический процесс, единственным результатом которого было бы превращение теплоты, получаемой системой от нагревателя или окружающей среды в работу. Это формулировка: а) первого закона термодинамики; б) второго закона термодинамики; в) третьего закона термодинамики; г) четвертого закона термодинамики; д) уравнения теплового баланса; е) затрудняюсь ответить.	
8. Уравнение Ван-дер-Ваальса для одного моля газа имеет вид: а) $\left(P + \frac{a}{V_\mu^2}\right)(V_\mu - b) = RT$; б) $PV_\mu = RT$; в) $\left(P + v^2 \frac{a}{V^2}\right)\left(\frac{V}{v} - b\right) = RT$; г) $\left(P + v^2 \frac{a}{V^2}\right)(V - vb) = vRT$; д) $\left(P + \frac{a}{V^2}\right)(V - vb) = RT$; е) нет правильного ответа.	

9. В каком из процессов перехода идеального газа из состояния 1 в состояние 2, изображённом на pV -диаграмме (см. рисунок), газ совершает наибольшую работу? а) А; б) Б; в) В; г) А и Б; д) А и В; е) во всех трёх процессах газ совершает одинаковую работу.



10. Какое понадобится время, чтобы на поверхность стекла нанести слой серебра толщиной $d = 5$ мкм, используя для этого атомарный пучок с концентрацией атомов серебра $n = 10^{18} \text{ м}^{-3}$, движущихся со скоростью $0,39 \text{ км/с}$? Плотность серебра 10500 кг/м^3 .
а) 4,5 мин; б) 5 мин; в) 180 с; г) 6 мин; д) 900 с; е) 450с.

Вариант 3

1. Какое из нижеприведённых утверждений справедливо?

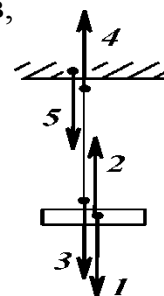
а) импульс тела - скалярная величина; б) путь и перемещение, векторные величины; в) сила – векторная величина; г) работа – векторная величина; д) путь – скалярная величина; е) ускорение свободного падения зависит от вида движения.

2. Маневровый тепловоз массой m_1 , движущийся с скоростью v_1 , сцепляется с вагоном массой m_2 , движущимся со скоростью v_2 . С какой скоростью будет двигаться состав сразу после сцепки?

а) $\frac{(m_1 + m_2) \cdot (m_1 v_1 + m_2 v_2)}{m_1 \cdot m_2}$; б) $\frac{m_1 \cdot (v_1 + v_2)}{m_2}$; в) $v_1 + v_2$; г) $\frac{m_2 \cdot (v_1 + v_2)}{m_1 + m_2}$;
д) после сцепки состав остановится; е) нет правильного ответа.

3. Тело подвешено на веревке к потолку. Укажите среди векторов, показанных на рисунке, вектор, соответствующий весу тела.

а) вектор 1; б) вектор 3; в) вектор 4;
г) вектор 2; д) вектор 5; е) вектора 1, 3, 5.

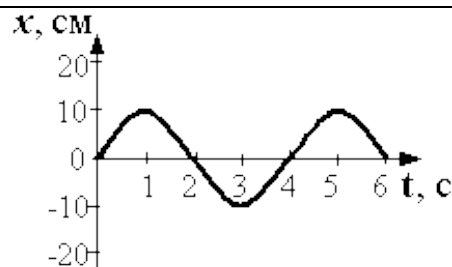


4. Кинетическая энергия падающего тела в некоторой точке траектории равна 9 Дж, а потенциальная энергия в три раза меньше. Чему будет равна полная

механическая энергия этого тела при достижении поверхности Земли? (Сопротивлением воздуха пренебречь).

- а) 12 Дж; б) 36 Дж; в) 2 Дж; г) 27 Дж; д) 24 Дж; е) 3 Дж.

5. На рисунке представлена зависимость координаты центра шара, подвешенного на пружине, от времени. Период колебаний равен:



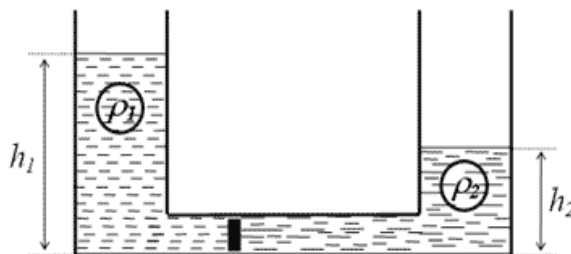
- а) 2 с; б) 4 с; в) 6 с; г) 8 с;
д) 10 с; е) 12 с.

6. Сколько столкновений в секунду испытывает молекула кислорода, если средняя длина свободного пробега при нормальных условиях равна 65 нм?

- а) $0,71 \cdot 10^9$; б) $71 \cdot 10^9$; в) $7,1 \cdot 10^8$; г) $7,1 \cdot 10^9$;
д) затрудняюсь ответить; е) нет правильного ответа.

7. В сообщающийся сосуд налиты две жидкости разделённые поршнем, который может скользить без трения в горизонтальной части сосуда. В каком из нижеприведённых соотношений (наиболее точно) находятся плотности этих жидкостей если $h_1 = 2h_2$?

- а) $\rho_1 > \rho_2$; б) $\rho_1 < \rho_2$;
в) $\rho_1 = \frac{1}{2} \rho_2$; г) $\rho_2 = \frac{1}{2} \rho_1$;
д) $\rho_1 = \rho_2$; е) $\rho_1 = 2\rho_2$.



8. Тепловой двигатель каждую секунду получает от нагревателя 50 кДж количество теплоты, развивая при этом мощность 20 кВт. Определить КПД этой машины. а) 20%; б) 30%; в) 40%; г) 25%; д) 250%; е) 84%.

9. Какой процесс произошёл в идеальном газе, если газ совершает работу за счёт убыли внутренней энергии?

- а) адиабатный; б) изотермический; в) изобарный; г) изохорный.

10. Какое количество алюминия, находящегося при температуре плавления, можно расплавить при сжигании 76 кг деревянных поленьев?

- а) 2000 т; б) 2 т; в) 1 т; г) 1,5 т.

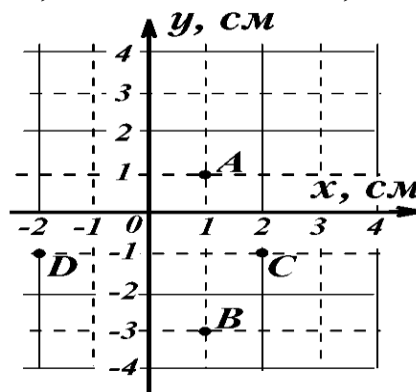
Вариант 4

1. В СИ угловое ускорение ε измеряется:

- а) $\frac{м}{с}$; б) $\frac{рад}{с}$; в) $\frac{рад}{с^2}$; г) $рад \cdot с^2$; д) $м \cdot с^2$; е) нет правильного ответа.

2. Если тело, первоначально находившееся в точке А (см. рисунок), изменило свои координаты на величины $\Delta x = 1$ см, $\Delta y = -2$ см, то можно сказать, что оно оказалось в точке...

- а) осталось в А; б) В;
в) D; г) С;
д) в другой точке плоскости;
е) недостаточно данных для решения задачи.



3. Человек массой 60 кг прыгнул с берега в неподвижную лодку со скоростью $8 \frac{м}{с}$. Если масса лодки 20 кг, то она станет двигаться по воде вместе с человеком в первый момент после прыжка человека со скоростью:

- а) $24 \frac{м}{с}$; б) $4 \frac{м}{с}$; в) $2 \frac{м}{с}$; г) $6 \frac{м}{с}$; д) $12 \frac{м}{с}$; е) $3 \frac{м}{с}$.

4. Укажите формулу определения периода колебаний математического маятника: а) $T = 2\pi\sqrt{\frac{\ell}{g}}$; б) $T = 2\pi\sqrt{LC}$; в) $T = 2\pi\sqrt{\frac{J}{mg\ell}}$;

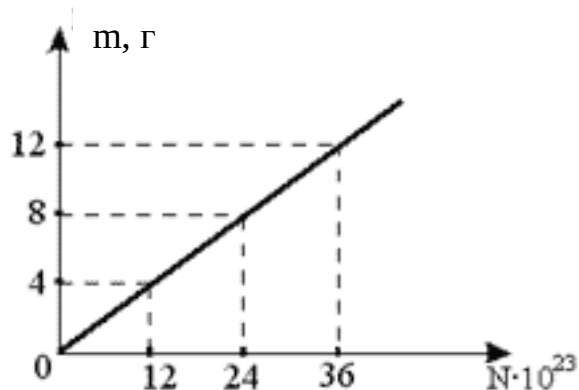
- г) $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$; д) $T = \frac{t}{n}$; е) нет правильного ответа.

5. При абсолютном удлинении пружины на 10 см совершена работа 10 кДж. Проекция силы упругости имеет значение:

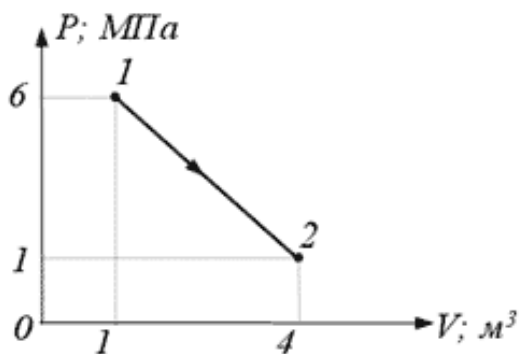
- а) $2 \cdot 10^4$ Н; б) $2 \cdot 10^5$ Н; в) $-2 \cdot 10^4$ Н;
г) $-2 \cdot 10^5$ Н; д) -20 Н; е) 10^5 Н.

6. На рисунке показана зависимость массы некоторого однородного газа от числа его молекул. Указать какие из нижеприведённых атомов составляют этот газ:

- а) ${}^4_2\text{He}$; б) ${}^1_1\text{H}$; в) ${}^{16}_8\text{O}$;
 г) ${}^{20}_{10}\text{Ne}$; д) ${}^{14}_7\text{N}$;
 е) нет вариантов ответа.



7. Если идеальный газ совершает изотермический переход, изображённый на рисунке, то масса газа...



- а) не изменилась;
 б) увеличилась в $2/3$ раз;
 в) увеличилась в 24 раза;
 г) уменьшилась в $2/3$ раз;
 д) уменьшилась в 24 раза;
 е) нет правильного ответа.

8. При нагревании тела градиент температуры направлен вдоль оси $+OY$, а перенос тепла происходит направлении:

- а) $+OX$; б) $-OY$; в) $-OZ$; г) $+OZ$; д) $+OY$; е) $-OX$.

9. Работу, равную 400 Дж за один цикл совершает тепловая машина. Температура нагревателя равна 500 К, температура холодильника 300 К, при этом количество теплоты, которое отдаётся холодильнику за один цикл равно: а) 200 Дж; б) 500 Дж; в) 400 Дж; г) 600 Дж; д) 300 Дж; е) 100 Дж.

10. Молекула метана CH_4 имеет число степеней свободы равное:

- а) 2; б) 3; в) 4; г) 5; д) 6; е) нет правильного ответа.

Вариант 5

1. Тело движется по закону $s = 20 + 2t + 4t^2$. Скорость и ускорение тела через 1 с равны:

- а) $8 \frac{м}{с}$ и $10 \frac{м}{с^2}$; б) $10 \frac{м}{с}$ и $8 \frac{м}{с^2}$; в) $15 \frac{м}{с}$ и $9 \frac{м}{с^2}$; г) $6 \frac{м}{с}$ и $10 \frac{м}{с^2}$;
 д) $12 \frac{м}{с}$ и $10 \frac{м}{с^2}$; е) нет правильного ответа.

2. Момент инерции материальной точки равен:

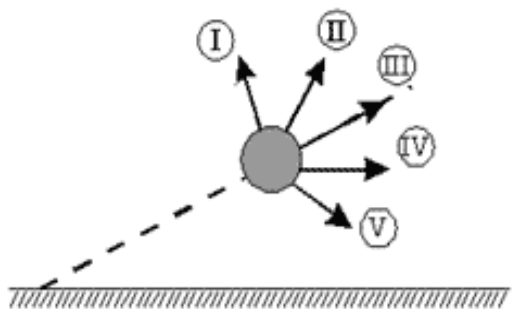
- а) $J = mr^2$; б) $J = \frac{1}{2}mr^2$; в) $J = mr^2$; г) $J = \frac{m}{r^2}$; д) $J = hr^2$; е) $J = \frac{r^2}{m}$

3. Стержень длиной $\ell = 40\text{см}$ колеблется около оси, перпендикулярной стержню и проходящей через его верхний конец. Период колебания такого маятника равен:

- а) 2,913 с; б) 0,937 с; в) 1,056 с; г) 1,847 с; д) 3,168 с;
 е) нет верного ответа.

4. Период колебаний тела при $s = 8\sin 3\pi t$ равен:

- а) 3с; б) $\frac{1}{3}$ с; в) 4с; г) $\frac{2}{3}$ с; д) 2с; е) нет правильного ответа.



5. Под действием внешней силы тело движется по прямолинейной траектории образующей некоторый угол с горизонтом. Указать направление (см. рисунок), которое соответствует линии действия внешней силы, при этом силой трения пренебречь:

- а) I; б) II; в) III;
 г) IV; д) V; е) нет правильного ответа.

6. Масса одной молекулы углекислого газа CO_2 равна:

- а) $7,3 \cdot 10^{-24}\text{кг}$; б) $4,6 \cdot 10^{-26}\text{кг}$; в) $7,3 \cdot 10^{-26}\text{кг}$;
 г) $10,4 \cdot 10^{-25}\text{кг}$; д) $8,4 \cdot 10^{-27}\text{кг}$; е) нет правильного ответа.

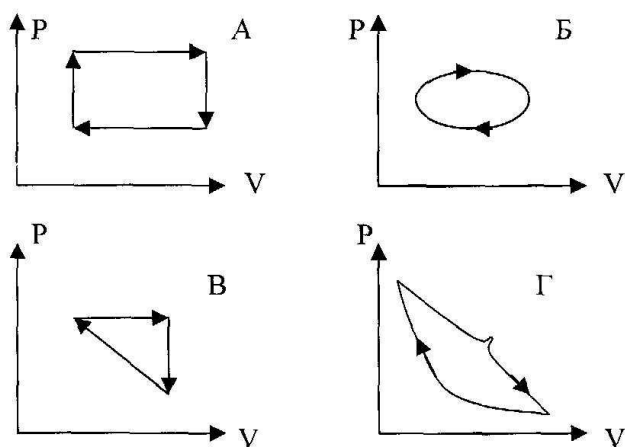
7. Плотность ρ азота в баллоне под давлением $P = 20$ ат, при температуре азота $T = 290\text{K}$ равна: а) $2,28 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; б) $22,8 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; в) $228 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; г) $1,57 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; д) $15,7 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; е) $157 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

8. Температура газа, если средняя кинетическая энергия поступательного движения его молекул равна $2,07 \cdot 10^{-21}$ Дж, имеет значение:

А) 273К; б) 200К; в) 100К; г) 300К; д) 158К; е) 373К.

9. Теплоемкость при постоянном объёме одноатомного газа, заключённого в сосуд ёмкостью $V = 20$ л при нормальных условиях равна в $\frac{\text{Дж}}{\text{К}}$:

а) 11,099; б) 1,345; в) 1,099; г) 22,318; д) 14,763; е) 12,743.



10. Тепловые машины работают по циклам, представляемым на рисунках, из них максимальный КПД при одинаковых температурах нагревателей и холодильников имеет:

а) Г; б) А; в) Б; г) В; д) Все имеют одинаковый КПД; е) затрудняюсь ответить.

Вариант 6

1. Линейная скорость связана с угловой скоростью выражением:

а) $v = \frac{\omega}{r}$; б) $v = \omega \cdot r$; в) $v = \frac{\omega}{t}$; г) $v = \omega \cdot t$; д) $v = \frac{\varphi}{r}$; е) $v = \omega \cdot \varphi$.

2. Диск начинает вращаться вокруг неподвижной оси, если угол поворота задаётся уравнением $\varphi = 3 + 2t^3$, то угловая скорость и угловое ускорение в момент времени $t = 2$ с равны:

- а) $40 \frac{\text{рад}}{c}$, $5 \frac{\text{рад}}{c^2}$; б) $20 \frac{\text{рад}}{c}$, $10 \frac{\text{рад}}{c^2}$; в) $24 \frac{\text{рад}}{c}$, $24 \frac{\text{рад}}{c^2}$;
 г) $5 \frac{\text{рад}}{c}$, $40 \frac{\text{рад}}{c^2}$; д) $10 \frac{\text{рад}}{c}$, $15 \frac{\text{рад}}{c^2}$; е) $32 \frac{\text{рад}}{c}$, $18 \frac{\text{рад}}{c^2}$.

3. Две силы, модули которых $F_1 = 3 \text{ Н}$ и $F_2 = 4 \text{ Н}$, приложены к одной точке тела, если угол между векторами этих сил составляет 90° , то модуль равнодействующей сил равен:

- а) $F = 1 \text{ Н}$; б) $F = 7 \text{ Н}$; в) $F = 5 \text{ Н}$; г) $F = 12 \text{ Н}$; д) $F = 25 \text{ Н}$; е) нет верных.

4. Два шара с одинаковыми массами m двигались навстречу друг другу с одинаковыми по модулю скоростями v и $-v$. После неупругого столкновения оба шара остановились, при этом изменение суммы импульсов в результате столкновения равно:

- а) $2mv$; б) mv ; в) 0 ; г) $-mv$; д) $-2mv$; е) $\frac{1}{2}mv$.

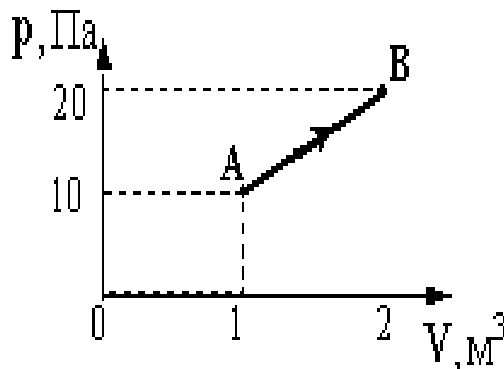
5. Груз массой 1 кг под действием силы 50 Н , направленной вертикально вверх, поднимается на высоту 3 м . Изменение кинетической энергии груза при этом равно:

- а) 30 Дж ; б) 80 Дж ; в) 120 Дж ; г) 150 Дж ; д) 180 Дж ; е) 200 Дж .

6. Показатель адиабаты равен: а) $\gamma = \frac{C_v}{C_p}$; б) $\gamma = C_p C_v$; в) $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$; г) $\gamma = C_p + C_v$; д) $\gamma = C_p - C_v$; е) затрудняюсь ответить.

7. При переходе из состояния А в состояние В (см. рисунок) температура идеального газа...

- а) увеличилась в 2 раза;
 б) увеличилась в 4 раза;
 в) уменьшилась в 2 раза;
 г) уменьшилась в 4 раза;
 д) не изменилась;
 е) затрудняюсь ответить.



8. В баллоне ртутной лампы объёмом $3 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$ при 300 К, если в ней содержится 10^{12} молекул и постоянная Больцмана $1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$, то пары ртути производят давление (в мкПа):

а) 24 Па; б) 67 Па; в) 112 Па; г) 138 Па; д) 256 Па; е) 300 Па.

9. Чтобы на поверхность стекла нанести слой серебра толщиной $d = 5 \text{ мкм}$ (плотность серебра $10500 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$), используя для этого атомарный пучок с концентрацией атомов серебра $n = 10^{18} \text{ м}^{-3}$, движущихся со скоростью $0,39 \frac{\text{км}}{\text{с}}$ понадобится время:

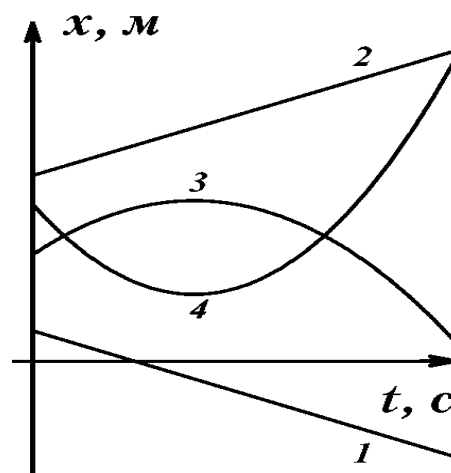
а) 4,5 мин; б) 6 мин; в) 900 с; г) 650 с; д) 180 с; е) 5 мин.

10. КПД тепловой машины 41%. Если теплота, потребляемая за цикл, увеличивается на 18%, а теплота, отдаваемая холодильнику, уменьшится на 6%, то КПД станет: а) 44%; б) 50%; в) 37%; г) 57%; д) нет правильного ответа; е) затрудняюсь ответить.

Вариант 7

1. На рисунке приведены графики зависимостей x – координаты тел от времени. Прямолинейному движению с постоянным ускорением, проекция которого на ось x положительна, соответствуют графики:

- а) только 1; б) только 2;
в) только 3; г) только 4;
д) только тела 3 и 4; е) только тела 1 и 2;
ж) все тела 1 – 4; з) ни одно из тел 1 – 4.



2. Тело движется по закону $x = 3 + 4t^2 + 2t^3$. Скорость и ускорение тела при $t = 1$ с равны:

- а) $10 \frac{м}{с}$ и $15 \frac{м}{с^2}$; б) $12 \frac{м}{с}$ и $18 \frac{м}{с^2}$; в) $14 \frac{м}{с}$ и $20 \frac{м}{с^2}$;
 г) $16 \frac{м}{с}$ и $10 \frac{м}{с^2}$; д) $17 \frac{м}{с}$ и $17 \frac{м}{с^2}$; е) $20 \frac{м}{с}$ и $14 \frac{м}{с^2}$.

3. Автомобиль массой m разгоняется по горизонтальной дороге с ускорением, равным по модулю a . Его вес равен:

- а) $P = mg$; б) $P = m(g + a)$; в) $P = m(g - a)$; г) $P = 0$;
 д) $P = \frac{m(g + a)}{2}$; е) $P = 2m(g + a)$.

4. Указать равенство, являющееся определением момента силы F относительно неподвижной точки:

- а) $M = [r \cdot F]$; б) $M = F \cdot d$; в) $M = J \cdot \varepsilon$; г) $M = F \cdot \varepsilon$;
 д) нет правильного ответа; е) затрудняюсь ответить.

5. Уравнение гармонических колебаний имеет вид $x = 10 \sin(4\pi t + \frac{\pi}{4})$, при этом амплитуда колебаний равна:

- а) 4 м; б) 6 м; в) 8 м; г) 10 м; д) 12 м; е) 14 м.

6. Молекула метана CH_4 имеет число степеней:

- а) 3; б) 4; в) 5; г) 6; д) 7; е) 8.

7. На сколько процентов надо уменьшить абсолютную температуру газа при увеличении его объёма в 7 раз, чтобы давление упало в 10 раз?

- а) 10; б) 20; в) 30; г) 40; д) 50; е) 60.

8. Воздух имеет температуру $38^\circ C$ и абсолютную влажность 25 г/м^3 . Если температура понизится до $10^\circ C$, то абсолютная влажность воздуха станет:

- а) $7 \frac{г}{м^3}$; б) $1 \frac{г}{м^3}$; в) $9,4 \frac{г}{м^3}$; г) $12 \frac{г}{м^3}$;
 д) затрудняюсь ответить; е) нет правильного ответа.

9. Давление в пузырьке воздуха (в атмосферах) диаметром 4 мкм, который находится в воде на глубине 5 м при нормальном атмосферном давлении равно:

а) 1,6; б) 1,2; в) 2,2; г) 1,8; д) 2,4; е) затрудняюсь ответить.

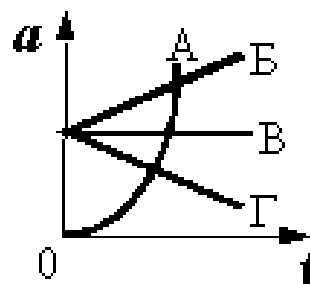
10. Медная проволока натянута горячей при температуре 150 °С между двумя прочными неподвижными стенками. Если считать закон Гука справедливым вплоть до разрыва стержня, то, остывая, проволока разорвётся при температуре:

а) 30 °С; б) 5 °С; в) 20 °С; г) 40 °С; д) 15 °С;
е) затрудняюсь ответить.

Вариант 8

1. Равноускоренному движению соответствует график зависимости модуля ускорения от времени, обозначенный на рисунке буквой:

а) А; б) Б; в) В; г) Г; д) Б и В; е) В и Г.



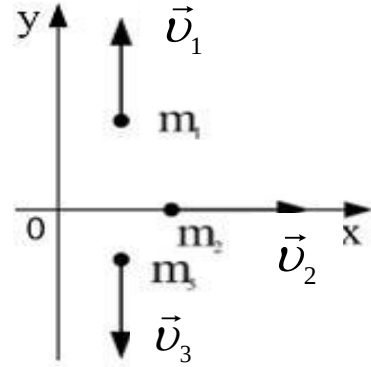
2. Маховик вращается по закону $\varphi = 2 + 16t - 2t^2$, его угловая скорость и угловое ускорение при вращении за $t = 1$ с равны:

а) $10 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ и $13 \frac{\text{рад}}{\text{с}^2}$; б) $14 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ и $16 \frac{\text{рад}}{\text{с}^2}$; в) $12 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ и $-4 \frac{\text{рад}}{\text{с}^2}$;
г) $18 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ и $10 \frac{\text{рад}}{\text{с}^2}$; д) $9 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ и $12 \frac{\text{рад}}{\text{с}^2}$; е) $4 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ и $-10 \frac{\text{рад}}{\text{с}^2}$.

3. Комета находилась на расстоянии 100 млн. км от Солнца. Как изменилась сила притяжения, действующая на комету при удалении кометы от Солнца на расстояние 200 млн. км?

а) уменьшилась в 2 раза; б) уменьшилась в 4 раза;
в) уменьшилась в 8 раз; г) увеличилась в 2 раза;
д) увеличилась в 4 раза; е) не изменилась.

4. Система состоит из трех шаров с массами $m_1 = 1$ кг, $m_2 = 2$ кг, $m_3 = 3$ кг, которые движутся так, как показано на рисунке. Если скорости шаров равны $v_1 = 3 \frac{m}{c}$, $v_2 = 2 \frac{m}{c}$, $v_3 = 1 \frac{m}{c}$, то величина скорости



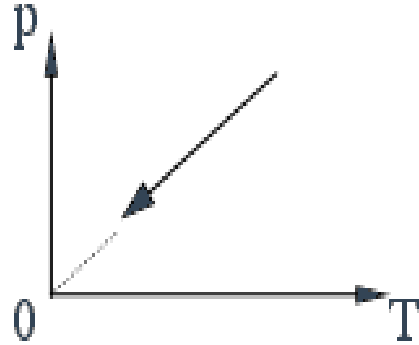
центра масс этой системы в $\frac{m}{c}$ равна:

- а) $\frac{2}{3}$; б) 4; в) $\frac{5}{3}$; г) 10; д) $\frac{3}{2}$; е) $\frac{3}{5}$.

5. При гармонических колебаниях вдоль оси ОХ координата тела изменяется по закону $x = 0,9 \cdot \cos 5t$ (м). Амплитуда колебаний равна:

- а) 5 м; б) 4,5 м; в) 0,9 м; г) 0,18 м; д) 1,2 м; е) 0,75 м.

6. На рисунке изображен график зависимости давления газа на стенки сосуда от температуры.



Указать процесс изменения состояния газа:

- а) изобарное нагревание;
б) изохорное охлаждение;
в) изотермическое сжатие;
г) изохорное нагревание;
д) изобарное охлаждение; е) изотермическое расширение.

7. При охлаждении твёрдого тела массой m температура тела понизилась на ΔT . Если удельная теплоёмкость вещества этого тела c , то количество отданной теплоты Q определяется выражением:

- а) $c \cdot m \cdot \Delta T$; б) $\frac{m \cdot \Delta T}{c}$; в) $\frac{c \cdot m}{\Delta T}$; г) $\frac{m}{c \cdot \Delta T}$;
д) затрудняюсь ответить; е) нет правильного ответа.

8. Уравнение Ньютона для определения силы внутреннего трения:

- а) $F = -k \cdot \frac{\Delta \rho}{\Delta x} \cdot \Delta S$; б) $F = -\eta \cdot \frac{\Delta v}{\Delta x} \cdot \Delta S$;
в) $F = -c \cdot \frac{\Delta m}{\Delta x} \cdot \Delta S$; г) $F = -\eta \cdot \Delta v \cdot \Delta x \cdot \Delta S$;
д) $F = -\eta \cdot \Delta m \cdot \Delta x \cdot \Delta S$; е) $F = -k \cdot \Delta v \cdot \Delta x \cdot \Delta S$.

9. Адиабатическим называется процесс, при котором:

- а) объём постоянен; б) давление постоянно;
 в) не совершается работа; г) нет теплообмена с окружающей средой;
 д) температура постоянна; е) совершается работа.

10. Энтропия изолированной термодинамической системы в ходе обратимого процесса а) только убывает; б) только увеличивается;

- в) остается постоянной; г) убывает и увеличивается;
 д) затрудняюсь ответить; е) нет правильного ответа.

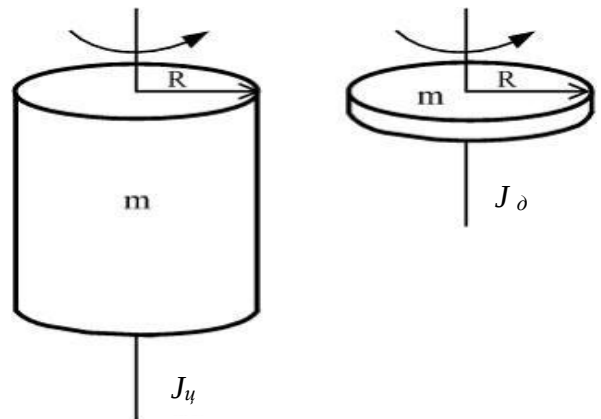
Вариант 9

1. Тело с начальной скоростью $5 \frac{m}{c}$, увеличивая скорость, движется прямолинейно с ускорением, модуль которого $a = 2 \frac{m}{c^2}$. При этом путь, пройденный телом за 4 с равен:

- а) 16 м; б) 20 м; в) 36 м; г) 40 м; д) 52 м; е) 18 м.

2. Диск и цилиндр имеют одинаковые массы и радиусы (рис.). Для их моментов инерции справедливо соотношение:

- а) $J_{ц} < J_{д}$; б) $J_{ц} = J_{д}$;
 в) $J_{ц} > J_{д}$; г) $J = 4 \cdot J_{д}$;
 д) $J_{ц} \geq J_{д}$; е) $J_{ц} \leq J_{д}$.



3. Под действием постоянной силы 10 Н тело движется прямолинейно по закону $S = 4 - 2t + t^2$. Масса тела равна:

- а) 1 кг; б) 10 кг; в) 5 кг; г) 7 кг; д) 15 кг; е) 2 кг.

4. Тело массой 0,05 кг совершает гармонические колебания, при которых его координата изменяется с течением времени по закону $x = 0,1 \sin 5t$ (в СИ).

Амплитуда колебаний тела имеет значение:

- а) 5 см; б) 0,5 м; в) 10 см; г) 5 м; д) 10 м; е) 1 м.

5. Кинетическая энергия падающего тела в некоторой точке траектории равна 9 Дж, а потенциальная энергия в три раза меньше. Полная механическая энергия этого тела при достижении поверхности Земли, если сопротивлением воздуха пренебречь, равна:

- а) 12 Дж; б) 36 Дж; в) 24 Дж; г) 14 Дж; д) 2 Дж; е) 27 Дж.

6. Дать правильный вариант уравнения Пуассона:

- а) $PV^\gamma = \text{const}$; б) $TV^\gamma = \text{const}$; в) $PT^\gamma = \text{const}$; г) $\frac{P^\gamma}{V} = \text{const}$; д) $\frac{V^\gamma}{P} = \text{const}$;

е) $\frac{P}{V^\gamma} = \text{const}$.

7. Высота поднятия жидкости в капиллярной трубке равна 10 мм. Если радиус капилляра уменьшить в три раза, то высота поднятия свободной поверхности той же жидкости, будет равна:

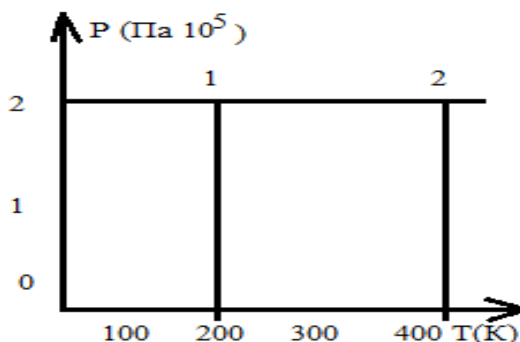
- а) 0,03 м; б) 30 м; в) $\frac{10^3}{3}$ м; г) 3 м; д) 0,3 м; е) $3 \cdot 10^3$ м.

8. Число атомов N в 1 кг водорода равно:

- а) $3 \cdot 10^{26}$; б) $1 \cdot 10^{25}$; в) $1 \cdot 10^{26}$; г) $4 \cdot 10^{25}$; д) $4 \cdot 10^{26}$; е) $3 \cdot 10^{25}$.

9. В изображённом на диаграмме $p - T$, процесс 1 – 2, давление в идеальном газе...

- а) не изменилось;
б) увеличилось в 4 раза;
в) увеличилось в 2 раза;
г) уменьшилось в 2 раза;
д) затрудняюсь ответить;
е) нет правильного ответа.



10. Если при неизменной температуре холодильника, температура нагревателя увеличилась на 20%, то КПД идеальной тепловой машины, в которой отношение абсолютной температуры холодильника к абсолютной температуре нагревателя равно 0,6, изменился:

- а) увеличился на 120%; б) увеличился на 10%;
 в) уменьшился на 125%; г) уменьшился на 5%;
 д) уменьшился на 10%; е) уменьшился на 25%.

Вариант 10

1. Вес тела в системе единиц СИ измеряется:

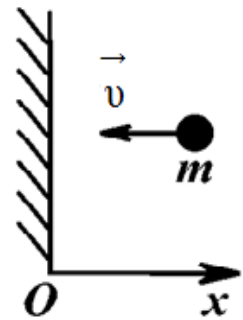
- а) кг; б) г; в) Н; г) $\frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}^2}$; д) $\frac{\text{м}}{\text{с}}$; е) нет правильного ответа.

2. На свободное тело массой 1 кг, которое находится в покое относительно ИСО, начинает действовать сила 10 Н.

Ускорение тела через 1 с после начала действия силы равно:

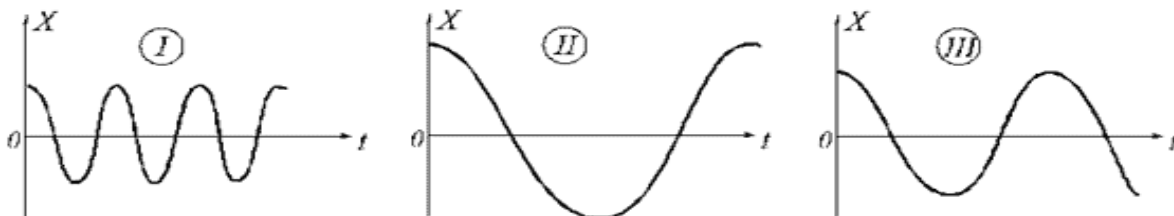
- а) $0,1 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$; б) $0 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$; в) $1 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$; г) $1,5 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$; д) $10 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$; е) $15 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$.

3. Металлический шарик массой $m = 40$ г, летящий горизонтально со скоростью $v = 5 \frac{\text{м}}{\text{с}}$, упруго ударяется о стальную плиту и отскакивает от нее в противоположном направлении (см. рисунок) с той же по модулю скоростью. Найдите проекцию Δp_x изменения импульса шарика.



- а) $\Delta p_x = -0,2 \text{ кг} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}}$; б) $\Delta p_x = 0,4 \text{ кг} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}}$;
 в) $\Delta p_x = -0,4 \text{ кг} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}}$; г) $\Delta p_x = 0,2 \text{ кг} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}}$; д) $\Delta p_x = 0 \text{ кг} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}}$;
 е) среди ответов нет верных.

4. На трех одинаковых упругих пружинах совершают незатухающие колебания три тела. Используя приведенные зависимости смещений тел от времени, указать соответствующие из нижеприведённых соотношений полные механические энергии этих тел:



- а) $W_1 > W_2 > W_3$; б) $W_2 > W_3 > W_1$; в) $W_2 < W_3 < W_1$;
 г) $W_1 < W_2 < W_3$; д) $W_1 = W_2 = W_3$; е) нет вариантов ответа.

5. Динамометр, к которому подвешен груз в лаборатории, находящейся на поверхности Земли, показывает 10 Н. Масса груза при этом равна:

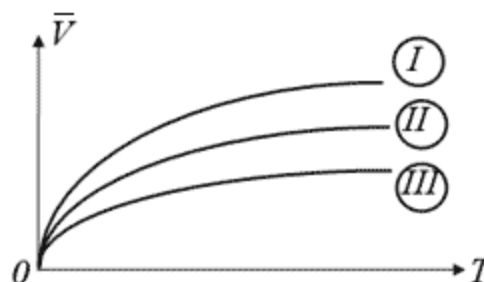
- а) 2 кг; б) 1 кг; в) 0,2 кг; г) 9,8 кг; д) 0,1 кг; е) 10 кг.

6. В сосуд до высоты 20 см налита вода и на тонкой нити опущена пластинка площадью 2 см^2 , находящаяся на расстоянии 15 см от дна. Если не учитывать атмосферное давление, то сила давления воды на нижнюю поверхность пластины будет равна:

- а) 0,3 Н; б) $2,5 \cdot 10^6 \text{ Н}$; в) 10^5 Н ; г) 0,1 Н; д) $3 \cdot 10^5 \text{ Н}$; е) 10^6 Н .

7. На рисунке приведен график зависимости средней квадратической скорости молекул от абсолютной температуры для трех газов (которые можно считать идеальными) водорода ${}^1_1\text{H}$; а) $\langle v_{\text{кв}} \rangle$ и кислорода ${}^{16}_8\text{O}$. Из нижеприведенных соответствий справедливо? $\vec{v}$

- а) I - кислород; II - азот; III - водород;
 б) I - кислород; II - водород; III - азот;
 в) I - водород; II - азот; III - кислород;
 г) I - азот; II - кислород; III - водород;
 д) I - водород; II - кислород; III - азот;
 е) нет вариантов.



8. Ртутный барометр имеет диаметр трубки 3 мм. При коэффициенте

поверхностного натяжения ртути $510 \frac{H}{м}$, в показания барометра, если учитывать капиллярное опускание ртути, нужно внести поправку x ?

а) 1,2 мм б) 2,4 мм; в) 3,6 мм; г) 4,8 мм; д) 5 мм; е) затрудняюсь ответить.

9. Какая энергия выделится при слиянии мелких водяных капель радиусом $2 \cdot 10^{-3}$ мм в одну каплю радиусом 2 мм? :

а) 2,88 мДж; б) 3,67 мДж; в) 4,12 мДж; г) 5,46 мДж;
д) затрудняюсь ответить; е) нет правильного ответа.

10. К стальной проволоке радиусом 1 мм подвешен груз. Под действием этого груза проволока получила такое же удлинение, как при нагревании на 20°C , при этом масса груза равна: а) 15 кг; б) 20 кг; в) 25 кг; г) 30 кг;

д) затрудняюсь ответить; е) нет правильного ответа.

Примеры решения задач

Задача 1. Стержень длиной 40см колеблется около оси, перпендикулярной стержню и проходящей через его верхний конец. Определить период колебаний такого маятника.

Дано:

Решение:

$$\ell = 40 \text{ см} = 0,4 \text{ м}$$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{J}{mga}}, \quad J = \frac{1}{3} ml^2 \quad a = \frac{\ell}{2}.$$

$$T = ? \quad T = 2\pi \sqrt{\frac{\frac{1}{3} ml^2 \cdot 2}{3mg\ell}} = 2\pi \sqrt{\frac{2\ell}{3g}} = 6,28 \sqrt{\frac{2 \cdot 0,4}{3 \cdot 9,8}} = 6,28 \sqrt{\frac{4}{3 \cdot 49}} = 6,28 \frac{2}{1,7 \cdot 7} = 1,056 \text{ с}$$

Ответ: 1,056 с

Задача 2. Пружина жёсткостью $\kappa = 10^3 \text{ Н/м}$ была сжата на $x_1 = 5 \text{ см}$. Какую нужно совершить работу, чтобы сжатие пружины увеличилось до $x_2 = 15 \text{ см}$?

Дано:

Решение:

$$\kappa = 10^3 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$$

$$x_1 = 5 \text{ см} = 5 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$x_2 = 15 \text{ см} = 15 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$A = ?$$

$$A = A - A_1$$

$$A_1 = \frac{\kappa x_1^2}{2};$$

$$A_2 = \frac{\kappa x_2^2}{2};$$

$$A = \frac{\kappa}{2} (x_2^2 - x_1^2) = \frac{10^3}{2} (225 \cdot 10^{-4} - 25 \cdot 10^{-4}) = \frac{10^3}{2} \cdot 200 \cdot 10^{-4} = 10 \text{ Дж}$$

Ответ: 10 Дж

Задача 3. Верхний конец стального стержня длиной 5 м с площадью поперечного сечения 4 см² закреплён неподвижно, к нижнему подвешен груз массой 2 т. Определить: 1) нормальное напряжение σ материала стержня; 2) абсолютное x и относительное ε удлинение стержня; 3) потенциальную энергию растянутого стержня.

Дано:

Решение:

$$\ell = 5 \text{ м}$$

Нормальное напряжение выражается формулой:

$$S = 4 \text{ см}^2 = 4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \quad \sigma = \frac{F}{S}, \text{ где } F \text{ сила, действующая вдоль оси стержня.}$$

$$m = 2 \text{ т} = 2 \cdot 10^3 \text{ кг} \quad F = mg, \text{ тогда } \sigma = \frac{mg}{S}, \sigma = 49 \text{ МПа.}$$

$$x = ?, \quad \varepsilon = ?$$

Абсолютное удлинение выражается формулой:

$$\sigma = ? \quad W_{\text{п}} = ? \quad x = \frac{F \ell}{ES}, \text{ если } E \text{ модуль Юнга, } E = 200 \text{ ГПа (для стали).}$$

$$x = 1,23 \cdot 10^{-3} \text{ м.} \quad \text{Относительное удлинение стержня } \varepsilon = \frac{x}{\ell} = 2,46 \cdot 10^{-4}.$$

Потенциальная энергия растянутого стержня $W_{\text{п}} = \frac{\varepsilon \sigma}{2} \cdot V$, где $V = S \cdot \ell$ - объём стержня, тогда $W_{\text{п}} = \frac{\varepsilon \sigma}{2} \cdot S \ell$. $W_{\text{п}} = 12,1 \text{ Дж}$

$$\text{Ответ: } 1,23 \cdot 10^{-3} \text{ м; } 2,46 \cdot 10^{-4}; \quad 49 \text{ МПа; } 12,1 \text{ Дж.}$$

Задача 4 Автомобиль массой 1,8 т движется в гору, уклон которой составляет 3 м на каждые 100 м пути. Определить работу, совершаемую двигателем на пути 5 км, если коэффициент трения равен 0,1; развиваемую двигателем мощность, если известно, что этот путь был преодолен за 5 мин.

Дано:

$$m = 1,8 \text{ т} = 1,8 \cdot 10^3 \text{ кг}$$

$$h = 3 \text{ м}$$

$$\ell = 100 \text{ м}$$

$$s = 5 \text{ км} = 5 \cdot 10^3 \text{ м}$$

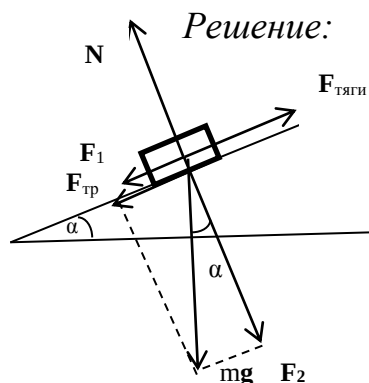
$$f = 0,1$$

$$\tau = 5 \text{ мин} = 300 \text{ с}$$

$$A = ?$$

$$N = ?$$

Решение:



$$A = F_1 \cdot s + F_{\text{тр}} \cdot s,$$

$$F_1 = mg \cdot \sin \alpha,$$

$$F_{\text{тр}} = f \cdot N = f \cdot mg \cdot \cos \alpha,$$

$$\sin \alpha = \frac{h}{\ell}$$

$$\cos \alpha = \sqrt{1 + \sin^2 \alpha},$$

$$A = mg \cdot s (\sin \alpha + f \cdot \cos \alpha)$$

$$N = \frac{A}{t}$$

$$\text{Ответ: } A = 11,5 \cdot 10^6 \text{ Дж, } N = 38,3 \cdot 10^3 \text{ Вт.}$$

Задача 5. Определить массу одной молекулы углекислого газа CO_2

Дано:

Решение:

CO_2

$$\mu = \mu_0 + \mu_c = 12 + 32 = 44 \text{ кг/кмоль}$$

$\mu = 44 \text{ кг/кмоль}$

$$m = \frac{\mu}{N_A} = \frac{44}{6,02 \cdot 10^{26}} = 7,3 \cdot 10^{-26} \text{ кг}, \quad N_0 = 6,02 \cdot 10^{26} \text{ кмоль}^{-1}$$

$m = ?$

Ответ: $7,3 \cdot 10^{-26} \text{ кг}$.

Задача 6. В баллоне ёмкостью 20 л находится аргон под давлением $p_1 = 800 \text{ кПа}$ и температуре $T_1 = 325 \text{ К}$. Когда из баллона было взято некоторое количество аргона, давления в баллоне понизилось до $p_2 = 600 \text{ кПа}$, а температура оказалась $T_2 = 300 \text{ К}$. Определить массу аргона, взятого из баллона.

Дано:

Решение:

$V = 20 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$

$\Delta m = m_1 - m_2$ Из ур. Менделеева-Клапейрона

$p_1 = 800 \cdot 10^3 \text{ Па}$

$$pV = \frac{m}{\mu} RT, \quad m_1 = \frac{p_1 V \mu}{RT_1} \quad \text{и} \quad m_2 = \frac{p_2 V \mu}{RT_2}$$

$T_1 = 325 \text{ К}$

По условию $V_1 = V_2 = V$ тогда $\Delta m = \frac{\mu p_1 V}{RT_1} - \frac{\mu p_2 V}{RT_2} \left(\frac{p_1}{T_1} - \frac{p_2}{T_2} \right)$

$$T_2 = 300 \text{ К} \quad \Delta m = \frac{40 \cdot 2 \cdot 10^{-2}}{8,32 \cdot 10^3} \left(\frac{8 \cdot 10^5}{325} - \frac{6 \cdot 10^5}{300} \right) = \frac{10^{-1}}{1,04 \cdot 10^3} (2462 - 2000) = \frac{46,2}{1040} = 0,044 \text{ кг}$$

$p_2 = 600 \cdot 10^3 \text{ Па}$

$\Delta m = ?$

$\mu = 40 \text{ кг/кмоль}, \quad R = 8,32 \cdot 10^3 \text{ Дж/моль К}$

Ответ: $0,044 \text{ кг}$.

Задача 7. Вычислить плотность ρ кислорода, находящийся в баллоне под давлением $p = 1 \text{ МПа}$ при температуре $T = 300 \text{ К}$.

Дано:

Решение:

$p = 1 \text{ МПа}$

$$pV = \frac{m}{\mu} RT \quad \rho = \frac{m}{V} = \frac{p\mu}{RT}$$

$T = 300 \text{ К}$

$$\rho = \frac{10^6 \cdot 32}{8,32 \cdot 10^3 \cdot 300} = \frac{320}{8,32 \cdot 3} = \frac{20}{0,52 \cdot 3} = \frac{20}{1,56} = 12,8 \text{ кг/кмоль}$$

$\rho = ?$

Ответ: $12,8 \text{ кг/кмоль}$

Задачи для самостоятельного решения

1. Тело массой 2 кг движется прямолинейно по закону $x = A - Bt + Ct^2 + Dt^3$ ($C = 2 \text{ м/с}^2$, $D = 0,4 \text{ м/с}^3$). Определить силу, действующую на тело в конце первой секунды движения. [3,2 Н].
2. Два груза одинаковой массы (по 0,5 кг) соединены нитью и перекинуты через невесомый блок, укреплённый на конце стола. Коэффициент трения груза m_2 о стол $f = 0,15$. Пренебрегая трением в блоке, определить:
1) ускорение, с которым движутся грузы; 2) силу натяжения нити. [4,17 м/с²; 2,82 Н].
3. Тело массой 5 кг падает с высоты 20 м. Определить сумму потенциальной и кинетической энергий тела в точке, находящейся от поверхности Земли на высоте 5 м. Трением тела о воздух пренебречь. Сравните эту энергию с первоначальной энергией тела. [981 Дж].
4. Пренебрегая трением, определите наименьшую высоту, с которой должна скатываться тележка с человеком по жёлобу, переходящему в петлю радиусом 6 м, и не оторваться от него в верхней точке петли. [15м].
5. Шар и сплошной цилиндр, изготовленные из одного и того же материала, одинаковой массы катятся без скольжения с одинаковой скоростью. Определите, во сколько раз кинетическая энергия шара меньше кинетической энергии сплошного цилиндра. [1,07].
6. Физический маятник представляет собой тонкий однородный стержень длиной 35 см. Определить, на каком расстоянии от центра масс должна быть точка подвеса, чтобы частота колебаний была максимальной. [$10,1 \cdot 10^{-2} \text{ м}$].
7. Два математических маятника имеющие одинаковую массу, а длину, отличающуюся в 1,5 раза, колеблются с одинаковой угловой амплитудой. Определить, какой маятник обладает большей энергией и во сколько раз. [1,5].
8. Скорость вращения колеса, момент инерции которого $2 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, вращающегося при торможении равно замедленно, за 1 мин уменьшилась от 300 мин^{-1} до 180 мин^{-1} . Определить: 1)угловое ускорение колеса; 2)момент силы торможения; 3)работу силы торможения.[$0,21 \text{ рад/с}^2$; 0,42 Н; 630 Дж].

9. Маховик, момент инерции J которого равен $40 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, начал вращаться равноускорено из состояния покоя под действием момента силы $M = 20 \text{ Н}\cdot\text{м}$. Вращение продолжалось в течение $t = 10 \text{ с}$. Определить кинетическую энергию W_k , приобретённую маховиком. [500 Дж].
10. В сосуде вместимостью 2,24 л при нормальных условиях находится кислород. Определить количество вещества и массу кислорода, а также концентрацию его молекул в сосуде. [0,1 моль; $3,2 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$; $2,68 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$]
11. Шарик всплывает с постоянной скоростью в жидкости, плотность которой в три раза больше плотности материала шарика. Определите отношение силы трения, действующей на шарик, к его весу. [2].
12. Определите: 1) плотность воздуха в сосуде; 2) концентрацию его молекул; 3) среднюю длину свободного пробега молекул, если сосуд откачан до давления 0,13 Па. Диаметр молекул воздуха принять равным 0,27 нм. Температуру воздуха 300 К. [$1,51 \cdot 10^{-6} \text{ кг/м}^3$; $3,14 \cdot 10^{19} \text{ м}$; 0,1 м].
13. Определите удельные теплоёмкости c_v и c_p , если известно, что некоторый газ при нормальных условиях удельный объём $0,7 \text{ м}^3/\text{кг}$. Что это за газ? [649 Дж/(кг·К); 909 Дж/(кг·К); O_2].
14. Определить количество теплоты, сообщённое газу, если в процессе изохорного нагревания кислорода объёмом 20 л, его давление изменилось на 100 кПа. [5 кДж].
15. Азот массой 14 г сжимают изотермически при температуре 300 К от давления 100 кПа до давления 500 кПа. Определите: 1) изменение внутренней энергии газа; 2) работу сжатия; 3) количество выделившейся теплоты. [0; -2,01 кДж; 2,01 кДж].
16. При адиабатическом расширении кислорода ($\nu = 2$ моль), находящегося при нормальных условиях, его объём увеличился в 3 раза. Определите: 1) изменение внутренней энергии газа; 2) работу расширения газа. [-4,03 кДж; 4,03 к Дж].
17. Воздушный пузырёк диаметром 0,02 мм находится на глубине 25 см под поверхностью воды. Определите давление воздуха в этом пузырьке. Атмосферное давление принять нормальным. Поверхностное натяжение воды 73 мН/м, а её плотность 1 г/см^3 . [118 кПа].
18. Какой объём занимает смесь газов – азота массой 1 кг и гелия массой 1 кг при нормальных условиях? [6,4 м³].

Глоссарий

Механика

Амплитудой колебания - максимальное значение колеблющейся величины.

Гармонические колебания - периодический процесс, при котором смещение колеблющегося тела происходит по закону синуса или косинуса.

Деформация твёрдого тела – изменение его размеров и формы, обычно сопровождающееся и изменением объёма тела.

Динамика - раздел механики, изучающий причины, вызывающие или изменяющие движение тел.

Жёсткость – это мера податливости тела деформации при заданном типе нагрузки. Чем больше жёсткость, тем меньше деформация. Жесткость пружины зависит от материала, размеров и длины пружины.

Закон всемирного тяготения - тела притягиваются друг к другу с силой, модуль которой пропорционален произведению их масс и обратно пропорционален квадрату расстояния между ними.

Закон Гука - сила упругости, возникающая в деформируемом теле, пропорциональна его удлинению и направлена противоположно направлению перемещения частиц тела.

Закон сохранения механической энергии - полная механическая энергия системы, в которой действуют только консервативные силы, сохраняется постоянной, т.е. не меняется со временем.

Закон сохранения момента импульса момент импульса замкнутой системы тел остаётся постоянным, т.е. не меняется с течением времени

Инерция— свойство тел сохранять состояние покоя или прямолинейного равномерного движения или явление сохранения скорости тела постоянной или равной нулю при условии отсутствия действия на тело других тел.

Кинетическая энергия - энергия механического движения тела, равная половине произведения массы тела на квадрат скорости.

Колебания называются **периодическими**, если значения всех физических величин, характеризующих колебательную систему и

изменяющихся при ее колебаниях, повторяются через равные промежутки времени.

Колебательное движение – такой процесс, при котором система многократно отклоняясь от своего состояния равновесия, каждый раз вновь возвращается к нему.

Масса тела - физическая величина, характеризующая инерционные и гравитационные свойства.

Математический маятник - это система, состоящая из материальной точки массой m , подвешенной на невесомой нерастяжимой нити, и колеблющаяся под действием силы тяжести

Материальная точка - физическая модель, тело, обладающее массой, размерами которого можно пренебречь, по сравнению с расстояниями до других тел.

Мгновенная скорость - векторная величина, равная первой производной перемещения движущейся точки по времени и направленная по касательной к траектории в каждой ее точке.

Механическое напряжение численно равно результирующей упругих сил F , действующей на единицу площади сечения тела S .

Модулем Юнга называется модуль упругости при продольном растяжении или сжатии и обозначается через E .

Момент вращающей силы (вращающий момент) относительно некоторой точки - есть векторное произведение силы на кратчайшее расстояние от точки до линии действия силы.

Момент импульса материальной точки относительно неподвижной точки векторная величина, равная векторному произведению радиуса вектора материальной точки на вектор ее импульса.

Момент инерции материальной точки – физическая величина, характеризующая инертность точки к изменению её угловой скорости под действием приложенного момента сил и измеряемая произведением массы точки на квадрат её расстояния от оси вращения.

Нормальное ускорение - векторная величина, характеризующая быстроту изменения скорости по направлению, направленная к центру кривизны траектории в данной точке.

Основной закон динамики вращательного движения: угловое ускорение, приобретаемое телом под действием вращающего момента, пропорционально вращающему моменту сил и обратно пропорционально моменту инерции тела.

Относительная деформация - мера деформации, равная отношению абсолютной деформации к первоначальному значению величины, характеризующей размеры или объем тела.

Периодом колебаний T называется время, за которое совершается полное колебание.

Потенциальная энергия - механическая энергия системы тел, определяемая их взаимным расположением и характером сил взаимодействия между ними.

Приведённой длиной, $l_{пр}$ физического маятника называется длина такого математического маятника, который имеет период, равный периоду колебания данного физического маятника.

Пружинный маятник – это груз массой m , подвешенный на абсолютно упругой пружине и совершающий гармонические колебания.

Свойство гармонических колебаний - период колебаний не зависит от амплитуды.

Свойство момента силы при переносе точки приложения силы вдоль линии ее действия момент силы относительно неподвижной точки не изменяется.

Сила трения - сила, действующая на тело, движущееся по поверхности другого тела, в результате действия которой механическая энергия движения тела превращается во внутреннюю энергию.

Сила упругости - сила, возникающая в деформируемом теле и противодействующая действию внешней силы.

Собственные или свободные колебания - колебания, которые совершает система при отсутствии внешнего воздействия за счёт

первоначально внесённой энергии (за счёт потенциальной энергии через начальное смещение или за счёт кинетической энергии через начальную скорость).

Тангенциальное ускорение - векторная величина, характеризующая изменение скорости по величине, направленная по касательной к траектории.

Угловая скорость - векторная величина, равная первой производной угла поворота по времени, и направленная вдоль оси вращения по правилу правого винта.

Удар – кратковременное взаимодействие двух или более тел, возникающее в результате их соприкосновения. Если в результате удара механическая энергия не переходит в другие формы энергии, то удар называется **абсолютно упругим** - удар, в результате которого в обоих взаимодействующих телах не остаётся никаких деформаций и вся кинетическая энергия, которой обладали тела до удара, после удара снова превращается в кинетическую энергию. **Абсолютно неупругий удар** - удар, в результате которого тела объединяются, двигаясь дальше как единое целое.

Упругая деформация - деформация, при которой тело восстанавливает прежнюю форму или размеры после прекращения действия внешних сил.

Упругость – свойство тел деформироваться под действием нагрузок и самопроизвольно восстанавливать свою первоначальную форму и свой первоначальный объем при снятии действующих нагрузок.

Уравнение моментов производная по времени от момента импульса L материальной точки относительно неподвижной оси равна моменту сил M , действующих на материальную точку, относительно этой оси.

Фазой колебаний φ называется аргумент функции, описывающий величину, изменяющуюся по закону гармонического колебания.

Физический маятник – это твёрдое тело, совершающее под действием силы тяжести колебания вокруг неподвижной горизонтальной оси, проходящей через точку, не совпадающую с центром масс тела.

Центр масс системы материальных точек (центр инерции) - воображаемая точка, положение которой характеризует распределение массы этой системы.

Циклической (круговой) частотой периодических колебаний называется величина, равная числу полных колебаний совершающихся за 2π единиц времени

Частотой периодических колебаний называется величина, равная числу полных колебаний, совершающихся за единицу времени или обратная величина периоду.

Число степеней свободы - число независимых координат, полностью определяющих положение точки в пространстве.

Элементарная работа силы - скалярное произведение силы и элементарного перемещения.

Основы молекулярной физики и термодинамики

Абсолютная влажность воздуха - масса водяного пара, содержащегося в 1 м^3 воздуха. В СИ абсолютная влажность измеряется в кг/м^3 , допущена к употреблению единица г/м^3 .

Адиабатический процесс – процесс, происходящий без теплообмена между системой и окружающей средой.

Аморфные тела - тела, сохраняющие свою форму вследствие повышения вязкости сильно переохлаждённой жидкости.

Внутренняя энергия системы – энергия хаотического (теплого) движения микрочастиц системы (молекул, атомов, электронов, ядер и т.д.) и энергия взаимодействия этих частиц.

Второе начало термодинамики - положение, устанавливающее направление течения и характер процессов, происходящих в природе.

Вязкость (внутреннее трение) - свойство реальных жидкостей оказывать сопротивление перемещению одной части жидкости относительно другой.

Газ называется идеальным, если выполняются условия:

- а) собственный объём молекул газа пренебрежимо мал по сравнению с объёмом сосуда;
- б) между молекулами отсутствуют силы взаимодействия;
- в) столкновения между молекулами и со стенками сосуда абсолютно упругие.

Градиент температуры показывает изменение температуры на единицу длины в направлении передачи теплоты.

Давление жидкости - физическая величина, равная нормальной силе, действующей со стороны жидкости на единицу площади.

Динамическое давление - физическая величина, пропорциональная произведению плотности жидкости на квадрат её скорости.

Длина свободного пробега – путь, пройденный молекулой между двумя последовательными столкновениями.

Диффузия – самопроизвольное проникновение и перемешивание частиц двух соприкасающихся газов, жидкостей и даже твёрдых тел; диффузия сводится к обмену масс частиц этих тел.

Закон Архимеда - на тело, погруженное в жидкость или газ, действует со стороны этой жидкости направленная вверх выталкивающая сила, равная весу вытесненной телом жидкости.

Закон Больцмана - закон о равнораспределении энергии по степеням свободы, согласно которому, на каждую поступательную и вращательную степени свободы приходится в среднем кинетическая энергия, равная $\frac{1}{2} kT$, а на колебательную степень свободы kT .

Закон внутреннего трения - закон, согласно которому плотность потока импульса прямо пропорционален градиенту скорости и направлена в сторону его убывания.

Закон Фурье – тепловой поток прямо пропорционален градиенту температуры и направлен в сторону его убывания.

Изопроцессы – процессы, происходящие с термодинамической системой, при которых один из основных параметров остаётся неизменным (давление, объём, температура).

Критическая температура - температура, зависящая от параметров реального газа, при которой уравнение Ван-дер-Ваальса имеет одно действительное решение, что свидетельствует о том, что реальный газ близок к идеальному.

Круговой процесс (цикл) – процесс, при котором система, пройдя ряд состояний, возвращается в исходное. Если за цикл совершается положительная работа (цикл протекает по часовой стрелке), то он называется **прямым**, если совершается отрицательная работа, то он называется **обратным**.

Моль - количество вещества, содержащее такое количество молекул, что и 0,012 кг изотопа углерода C_{12} .

Молярная теплоёмкость – величина, равная количеству теплоты, необходимому для нагревания 1 моля вещества на 1 К, $C_M = \frac{\delta Q}{\nu dT}$.

Неравновесное состояние - Состояние системы, при котором хотя бы один из термодинамических параметров не имеет определённого значения

Обратимый термодинамический процесс – если он протекает как в прямом, так и в обратном направлении, причём если такой процесс происходит сначала в прямом, а затем в обратном направлении и система возвращается в исходное состояние, то в окружающей среде и в этой системе не происходит никаких изменений. Если протекающий процесс не удовлетворяет этим условиям, то процесс **необратимый**.

Основное уравнение молекулярно-кинетической теории - уравнение, выражающее прямо пропорциональную зависимость давления газа от концентрации молекул, массы молекул и квадрата среднеквадратичной скорости молекул.

Относительная влажность – отношение упругости водяного пара p , содержащегося в воздухе при данной температуре, к максимальной упругости p_0 (упругости насыщенного пара) при этой же температуре

Относительная молекулярная масса - отношение массы молекулы вещества к 1/12 массы изотопа углерода C_{12} .

Парциальное давление – давление, оказываемое химически индивидуальным газом, содержащимся в газовой смеси, равное давлению,

которое оказывал бы этот газ, если удалить из занимаемого газовой смесью объёма остальные газы, при условии сохранения первоначального объёма и температуры.

Первое начало термодинамики - уравнение вида $\delta Q = dU + \delta A$, количество теплоты, сообщённое системе, идёт на изменение внутренней энергии и совершение системой работы над внешними телами

Политропный процесс – процесс, при котором теплоёмкость остаётся неизменной.

Приведённое количество теплоты – отношение теплоты, полученное телом в изотермическом процессе, к температуре теплоотдающего тела

Равновесное состояние - состояние системы, при котором все термодинамические параметры имеют определенные значения, в котором система может оставаться сколь угодно долго при неизменных внешних условиях.

Текущность – свойство тел пластически или вязко деформироваться под действием механического напряжения.

Теорема Клаузиуса - сумма приведённых теплот при переходе идеального газа из одного состояния в другое не зависит от пути перехода.

Теплоёмкость тела - называется количество теплоты, которое нужно сообщить какому-либо телу, чтобы повысить его температуру на 1 К.

Термодинамическая система – совокупность макроскопических тел, которые взаимодействуют и обмениваются энергией как между собой, так и с другими телами.

Термодинамический процесс – любое изменение в термодинамической системе, связанное с изменением хотя бы одного из параметров (давления, температуры, объёма).

Точка росы - температура, которую имеет воздух, если охладить его изобарически (при постоянном давлении) до состояния насыщения находящегося в нем водяного пара.

Тройная точка - точка, в которой пересекаются кривые фазового равновесия, определяющая условия одновременного равновесного сосуществования трёх фаз вещества.

Удельная теплоёмкость вещества – величина, равная количеству теплоты, необходимому для нагревания 1 кг вещества на 1 К, $c = \frac{\delta Q}{mdT}$.

Уравнение Ван-дер-Ваальса - уравнение состояния реального газа, учитывающее с помощью поправок собственный объем молекул газа и силы межмолекулярного взаимодействия.

Уравнение состояния идеального газа (уравнение Менделеева – Клапейрона) – уравнение вида $pV_m = RT$, где V_m – молярный объем, а R – молярная газовая постоянная.

Фаза – термодинамически равновесное состояние вещества, отличающееся по физическим свойствам от других возможных равновесных состояний того же вещества

Фазовый переход – переход вещества из одной фазы в другую

Фазовый переход I рода - фазовый переход, сопровождающийся поглощением или выделением теплоты.

Фазовый переход II рода – фазовый переход, не связанный с поглощением или выделением теплоты, сопровождающийся скачкообразным изменением теплоемкости.

Явление теплопроводности заключается в направленном переносе энергии и возникает тогда, когда различные части среды имеют различную температуру, то есть обладают различной внутренней энергией.

ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ, ОПРЕДЕЛЕНИЯ И ФОРМУЛЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В РАБОТАХ

Деформацией твёрдого тела называют *изменение его размеров и формы*, обычно сопровождающееся изменением объёма тела.

Если после прекращения действия сил, вызывающих деформацию, она исчезнет, такую деформацию называют **упругой**.

Механическое напряжение численно равно результирующей упругих сил F , действующей на единицу площади сечения тела S .

$$\sigma = \frac{F}{S}$$

Когда сила F направлена по нормали к поверхности S , напряжение называют **нормальным**.

Относительная деформация ε - мера деформации, равная отношению абсолютной деформации Δx к первоначальному значению величины x , характеризующей размеры или объем тела. $\varepsilon = \frac{\Delta x}{x}$

Закон Гука:

механическое напряжение, возникающее в упруго деформированном теле, прямо пропорционально относительной деформации.

$$\sigma = k \cdot \varepsilon$$

$$\sigma = E \frac{\Delta \ell}{\ell}$$

Модулем Юнга называется модуль упругости при продольном растяжении или сжатии и обозначается через E .

Вращательным движением твёрдого тела называется такое движение, при котором все точки тела движутся по окружности, центры которых лежат на одной и той же прямой, называемой осью вращения

Вращательным моментом, или моментом вращающей силы называется векторная физическая величина $\vec{M}$, равная векторному произведению радиуса – вектора $\vec{r}$, проведённого из точки O в точку приложения силы на вектор силы $\vec{F}$.

$$\vec{M} = [\vec{r} \vec{F}]$$

Основной закон динамики вращательного движения:

угловое ускорение, приобретаемое телом под действием вращающего момента, пропорционально вращающему моменту сил и обратно пропорционально моменту инерции тела, то есть

$$\vec{\epsilon} = \frac{\vec{M}}{J}.$$

Момент инерции J – это физическая величина, которая характеризует инертность тела к изменению угловой скорости под действием вращательного момента.

Момент инерции материальной точки относительно какой-либо оси равен произведению массы m_i этой точки на квадрат расстояния r_i до оси вращения $J_i = m_i r_i^2$.

Момент инерции системы (тела) относительно данной оси есть физическая величина, равная сумме произведений масс n материальных точек системы на их квадраты расстояний до рассматриваемой оси.

$$J = \sum_{i=1}^n m_i r_i^2.$$

Закон сохранения механической энергии:

механическая энергия замкнутой системы не изменяется, если все внутренние силы потенциальны, либо не совершают работы.

Закон сохранения и превращения энергии:

энергия системы может переходить из одной формы в другую и перераспределяться между частями системы, но изменение полной энергии системы в любом процессе всегда равно энергии, полученной системой извне в этом процессе.

$$W = \text{const}$$

Колебаниями называются движения или процессы, которые характеризуются определённой повторяемостью во времени.

Периодом колебаний T называется время, за которое совершается полное колебание

$$T = \frac{t}{n}.$$

Частотой периодических колебаний ν называется величина, равная числу полных колебаний, совершающихся за единицу времени или

обратная величина периоду

$$\nu = \frac{n}{t} = \frac{1}{T}$$

Циклической (круговой) частотой периодических колебаний называется величина, равная числу полных колебаний совершающихся за 2π

единиц времени.

$$\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T}.$$

Фазой колебаний φ называется положение материальной точки в данный момент времени.

Гармонические колебания – колебания, при которых колеблющаяся величина изменяется со временем по закону синуса (косинуса)

$$x = A \sin(\omega t + \varphi_0)$$

Пружинный маятник – это груз массой m , подвешенный на абсолютно упругой пружине и совершающий гармонические колебания.

Упругость – свойство тел деформироваться под действием нагрузок и самопроизвольно восстанавливать свою первоначальную форму и свой первоначальный объем при снятии действующих нагрузок.

Жёсткость – это мера податливости тела деформации при заданном типе нагрузки. Чем больше жёсткость, тем меньше деформация. Жёсткость пружины зависит от материала, размеров и длины пружины.

Уравнение движения пружинного маятника (дифференциальное уравнение гармонических колебаний)

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{k}{m}x = 0$$

Циклическая частота пружинного маятника $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$

Период колебаний пружинного маятника $T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$

Физический маятник – это твёрдое тело, совершающее под действием силы тяжести колебания вокруг неподвижной горизонтальной оси, проходящей через точку O , не совпадающую с центром масс C тела.

Период колебаний физического маятника $T_{\text{физ}} = 2\pi \sqrt{\frac{J}{mg\ell}}$

Период колебаний математического маятника $T_{\text{мат}} = 2\pi \sqrt{\frac{\ell}{g}}$

Приведённой длиной $\ell_{\text{пр}}$ физического маятника называется длина такого воображаемого математического маятника, который имеет период, равный периоду колебаний данного физического маятника. $\ell_{\text{пр}} = \frac{J}{m\ell}$.

Математический маятник - это система, состоящая из материальной точки массой m , подвешенной на невесомой нерастяжимой нити, и колеблющаяся под действием силы тяжести.

Явления переноса называются процессы, при которых происходит перенос энергии, импульса и массы вещества, обусловленные тепловым движением молекул при наличии градиентов температуры, скорости и концентрации

Динамическая вязкость — это величина, численно равная силе внутреннего трения, приходящейся на единицу площади соприкосновения слоёв при единичном градиенте скорости. Единица вязкости — паскаль – секунда ($\text{Па} \cdot \text{с}$).

Градиент скорости $\frac{\Delta v}{\Delta x}$ — величина, которая показывает, как быстро меняется скорость при переходе от слоя к слою в направлении x , перпендикулярном направлению движения слоёв.

Ламинарным (слоистым) называется течение, если вдоль потока каждый выделенный тонкий слой скользит относительно соседних, не перемешиваясь с ними, в противном случае течение называется **турбулентным**.

Текучесть — свойство тел пластически или вязко деформироваться под действием механического напряжения

$$\varphi = \frac{1}{\eta}.$$

Сила Архимеда F – сила, действующая на шарик (тело), погруженный в жидкость, выталкивающая его вверх и численно равная весу жидкости, вытесненной шариком (телом)

$$F = \rho_2 g V, \text{ где } \rho_2 - \text{плотность жидкости.}$$

Закон Стокса – сила сопротивления при движении шарообразных тел в жидкости или газе, прямо пропорциональна коэффициенту вязкости жидкости η , величине радиуса r или d и скорости движения v шарика

$$F = 6\pi\eta r \cdot v = 3\pi\eta d v.$$

Уравнение Фурье $dQ = -\chi \frac{T_1 - T_2}{x} S dt.$

Градиент температуры $\frac{T_1 - T_2}{x}$ показывает изменение температуры

на единицу длины в направлении передачи теплоты.

Коэффициент теплопроводности χ численно равен количеству теплоты, проходящему через единичную площадку в 1 м^2 , перпендикулярную потоку теплоты, за единицу времени 1 с при градиенте температуры, равном -1 К/м .

Атмосферным давлением называется давление смеси, из которой состоит воздух, то есть из смеси газов и паров.

Парциальным давлением называется давление одного из газов или пара. находящегося в смеси газов.

Закон Дальтона давление газовой смеси равно сумме парциальных давлений входящих в неё газов

$$p_{\text{смеси}} = p_1 + p_2 + p_3 + \dots + p_n.$$

Динамическое равновесие наступает, если число молекул, покидающих жидкость за одну секунду, равно числу молекул, возвращающих в нее за то же время из пара: количество жидкости и пара остаётся неизменным.

Насыщенный пар – это пар, находящийся в равновесии с жидкостью.

Абсолютная влажность воздуха – масса водяного пара, содержащегося в 1 м^3 воздуха. В СИ абсолютная влажность измеряется в $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, допущена к употреблению единица г/м^3 .

Уравнение Менделеева – Клапейрона $pV = \frac{m}{\mu} RT$.

Относительная влажность - отношение абсолютной влажности к максимальной $B = \frac{P}{P_{\text{макс}}} 100\%$.

Точка росы – температура, которую имеет воздух, если охладить его изобарически (при постоянном давлении) до состояния насыщения находящегося в нем водяного пара.

Удельная влажность q - количество водяного пара, содержащегося в 1 кг влажного воздуха.

Удельной теплоёмкостью c газа называется физическая величина, численно равная количеству теплоты, которое необходимо сообщить единице массы газа, чтобы увеличить ее температуру на 1К в рассматриваемом термодинамическом процессе.

Молярной теплоёмкостью C_m называется количество теплоты, необходимое для нагрева моля вещества на 1К

$$C_m = M \cdot c.$$

Первое начало термодинамики, теплота, сообщаемая системе, расходуется на изменение её внутренней энергии и на совершение ею работы против внешних сил

$$\delta Q = dU + \delta A.$$

Энтропия - функция состояния. Если система получает от окружающих тел (или отдаёт им) тепло dQ , то её энтропия меняется на величину

$$dS = \frac{dQ}{T}$$

Функция $f(x)$ называется **плотность вероятности функции распределения случайной величины** x . Явный вид этой функции был

получен К. Гауссом и имеет вид $f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{e^{-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma^2}}}{\sigma}$

Средняя длина свободного пробега λ , как среднее расстояние между столкновениями, пройденное за время $\Delta\tau$, делёное на число столкновений, произошедших за время $\Delta\tau$: $\lambda = \frac{v \cdot \Delta\tau}{n \cdot \pi(2r)^2 \cdot v \cdot \Delta\tau}$

Наименование величин, обозначения, единицы физических величин		
Наименование	Формулы	Единицы физических величин
Плотность вещества	$\rho = \frac{m}{V}$	$\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$
Вес тела	$\vec{P} = m\vec{g}$	Н
Сила тяжести	$\vec{F} = m\vec{g}$	Н
Второй закон Ньютона	$\vec{F} = m\vec{a}$	–
Сила гравитационного тяготения	$F = G \frac{m \cdot M}{R^2}$	Н
Сила трения	$\vec{F} = \mu \vec{N}$	Н
Работа переменной силы на участке траектории	$A = \int_1^2 F \cos \alpha \cdot ds$	Дж
Механическое напряжение	$\sigma = \frac{F}{S}$	Па
Относительная деформация	$\varepsilon = \frac{\Delta x}{x}$	–
Закон Гука для любого вида упругих деформаций	$\sigma = k \cdot \varepsilon$ $F_{\text{упр}} = -kx$	Па Н
Модуль Юнга	$E = \frac{F\ell}{S\Delta\ell}$	$1\text{Па} = \frac{1\text{Н}}{1\text{м}^2} = 1\frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$
Формулы связи линейных и угловых величин	$s = \varphi r$	м
	$v = \omega r$	$\frac{\text{м}}{\text{с}}$
	$a = \varepsilon r$	$\frac{\text{м}}{\text{с}^2}$
Нормальное ускорение	$a_n = \frac{v^2}{R}$	$\frac{\text{м}}{\text{с}^2}$

Наименование величины	Формулы	Единицы физических величин
Вращательный момент или момент вращающей силы относительно неподвижной точки	$\vec{M} = [\vec{r}\vec{F}]$	Н·м
Момент инерции системы (тела)	$J = \sum_{i=1}^n m_i r_i^2.$	кг·м ²
Основной закон динамики вращательного движения	$\vec{M} = \frac{d\vec{L}}{dt}$	$\frac{\text{рад}}{\text{с}^2}$
Кинетическая энергия	$W_k = \frac{mv^2}{2}$	Дж
Кинетическая энергия вращающегося тела	$W_k = \frac{J\omega^2}{2}$	Дж
Потенциальная энергия тела, поднятого над поверхностью Земли	$W_n = mgh$	Дж
Потенциальная энергия упругодеформированного тела	$W_n = \frac{kx^2}{2}$	Дж
Закон сохранения полной механической энергии системы	$W = W_k + W_n$	—
Период колебаний	$T = \frac{t}{n}$	с
Частота периодических колебаний	$\nu = \frac{1}{T} = \frac{n}{t}$	с ⁻¹
Циклическая (круговая) частота периодических колебаний	$\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T}$	$\frac{\text{рад}}{\text{с}}$

Наименование величины	Формулы	Единицы физических величин
Уравнение гармонических колебаний	$x = A \sin (\omega t + \varphi_0)$	—
Дифференциальное уравнение свободных гармонических колебаний величины s	$\frac{d^2 s}{dt^2} + \omega_0^2 s = 0$	—
Период колебаний физического маятника	$T = 2\pi \sqrt{\frac{J}{mg\ell}}$	с
Период колебаний математического маятника	$T = 2\pi \sqrt{\frac{\ell}{g}}$	с
Период колебаний пружинного маятника	$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$	с
Коэффициент упругости пружинного маятника	$k = m\omega^2$	$\frac{\text{Н}}{\text{м}}$
Жёсткость пружины	$C = \frac{4\pi^2}{k}$	$\frac{\text{м}}{\text{Н}}$
Приведённая длина	$\ell_{np} = \frac{J}{m\ell}, \quad \ell_{np} = \frac{T^2 g}{4\pi^2}$	м
Теорема Шнейнера	$J = J_c + m\ell^2$	—
Закон Ньютона (сила внутреннего трения)	$F = -\eta \frac{dv}{dx} S$	Н
Текущность жидкости или газа	$\varphi = \frac{1}{\eta}$	$(\text{Па} \cdot \text{с})^{-1}$
Закон Стокса	$F = 6\pi\eta r \cdot v = 3\pi d\eta v$	—
Коэффициент вязкости жидкости	$\eta = \frac{(\rho_1 - \rho_2)gd^2}{18v}$	Па·с
Кинематическая вязкость	$\nu = \frac{\eta}{\rho}$	$\frac{\text{м}^2}{\text{с}}$

Наименование величины	Формулы	Единицы физических величин
Уравнение Фурье	$dQ = -\chi \frac{dT}{dx} S d\tau$	—
Количество теплоты, выделенное при нагревании	$\delta Q = c \cdot m \cdot dT$	Дж
Коэффициент теплопроводности	$\chi = \frac{2,3(c_1 m_1 + c_2 m_2) \times \ell g \frac{T_H - T_0}{T_H - T_1}}{S \tau}$	$\frac{\text{Вт}}{\text{мК}}$
Закон Дальтона	$p_{\text{смеси}} = p_1 + p_2 + p_3 + \dots p_n$	—
Уравнение Менделеева - Клапейрона	$pV = \frac{m}{\mu} RT$	—
Относительная влажность	$B = \frac{P}{P_{\text{max}}} 100\%$	%
Удельная теплоёмкость	$c = \frac{\delta Q}{m dT}$	$\frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{кг}}$
Молярная теплоёмкость	$C_M = M \cdot c$	$\frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{моль}}$
Первое начало термодинамики	$\delta Q = dU + \delta A$	—
Коэффициент Пуассона	$\gamma = \frac{c_p}{c_v} = \frac{i+2}{i}$	—
Функция распределения молекул по скоростям	$F(v) = 4\pi \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot e^{-\frac{mv^2}{2kT}} \cdot v^2$	
Средняя длина свободного пробега молекул	$\lambda = \frac{1}{4\pi r^2 \cdot n \sqrt{2}}$	м
Объём газа, протекающего при ламинарном течении через капилляр, радиусом r за время τ	$V = \frac{\pi \cdot r^2}{8 \cdot \eta \cdot \ell} \cdot \Delta p \cdot \tau =$	м ³

Вопросы к зачёту и экзамену

1. Способы задания движения материальной точки (векторный, координатный, естественный).
2. Скорость материальной точки. Мгновенная, средняя скорость движения. Кинематическое уравнение при неравномерном и равномерном движении.
3. Ускорение материальной точки. Мгновенное, среднее ускорение движения.
4. Движение материальной точки по окружности. Нормальное и тангенциальное ускорение.
5. Вращательное движение. Кинематическое уравнение движения.
6. Мгновенная, средняя угловая скорость. Закон движения при равномерном и неравномерном движении. Направление вектора скорости.
7. Мгновенное и среднее угловое ускорение движения. Направление вектора ускорения.
8. Связь линейных и угловых величин.
9. Динамика поступательного движения. Закон инерции. Инерциальные системы отсчета.
10. Основной закон динамики поступательного движения (II закон Ньютона). Принцип независимости действия сил.
11. Закон действия и противодействия.
12. Силы трения в природе. Привести примеры.
13. Импульс. Закон сохранения импульса.
14. Энергия. Закон сохранения энергии.
15. Потенциальная и кинетическая энергия.
16. Работа при перемещении тела, мощность, единицы измерения.
17. Абсолютно упругий и неупругий удары.
18. Абсолютно твёрдое тело. Момент инерции тела. Теорема Штейнера.
19. Вращающий момент. Основной закон динамики вращательного движения.
20. Момент импульса тела. Закон сохранения момента импульса.
21. Кинетическая энергия вращения.
22. Колебательный процесс. Виды колебаний. Гармонические колебания, уравнение, определение всех составляющих.
23. Собственные колебания, дифференциальное уравнение.
24. Свободные колебания, дифференциальное уравнение, логарифмический декремент затухания, физический смысл.
25. Вынужденные колебания, дифференциальное уравнение. Явление резонанса.
26. Сложение колебаний.
27. Механика жидкости. Уравнение неразрывности струи. Закон Паскаля. Закон Архимеда.
28. Уравнение Бернулли.
29. Основы МКТ.
30. Идеальный газ. Температура. Термометры, виды термометров.

31. Изотермический процесс. Уравнения, диаграммы. Получение процесса.
32. Изобарический процесс. Уравнения, диаграммы. Получение процесса.
33. Изохорический процесс. Уравнения, диаграммы.
34. Закон Дальтона. Парциальное давление. Получение процесса.
35. Объединённый газовый закон. Закон Авогадро. Уравнение Менделеева-Клапейрона.
36. Скорость поступательного движения молекул. Опыт Штерна. Вероятная, среднеквадратичная, средняя арифметическая скорость движения молекул.
37. Среднее число столкновений молекул, средняя длина свободного пробега молекул.
38. Явления переноса. Теплопроводность, уравнение Фурье.
39. Явления переноса. Диффузия, уравнение Фика.
40. Явления переноса. Вязкость, уравнение Ньютона.
41. Поверхностное натяжение жидкости. Добавочное давление. Формула Лапласа.
42. Явление смачивания и несмачивания. Полное смачивание. Формула Борелли-Жюрена.
43. Число степеней свободы. Внутренняя энергия массы вещества.
44. Теплоёмкости газа. Молярная и удельная теплоёмкости.
45. Физический смысл универсальной газовой постоянной. Уравнение Майера.
46. Основы термодинамики. Условия существования обратимого процесса. Первое начало термодинамики.
47. Применение первого начала термодинамики к изопроцессам.
48. Адиабатический процесс. Уравнение Пуассона, диаграмма. Получение процесса. Ответить на вопрос: почему адиабата круче изотермы?
49. Второе начало термодинамики. Круговой процесс (цикл). Термический коэффициент.
50. Тепловые машины и холодильники. Цикл Карно.
51. Энтропия. Положения Клаузиуса.

Приложение

Таблица 1

Площади и объёмы некоторых геометрических фигур

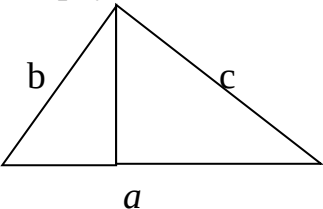
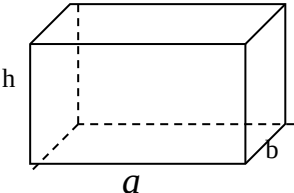
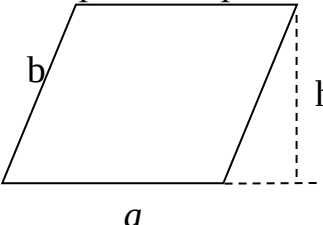
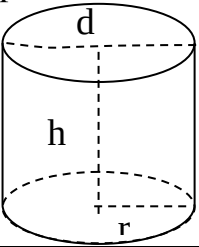
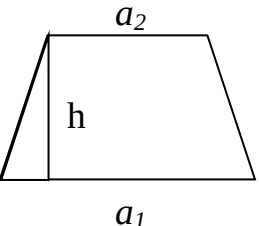
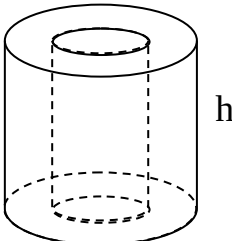
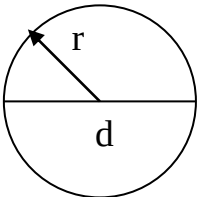
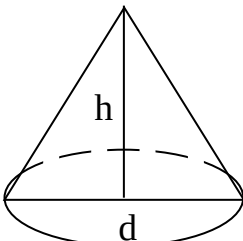
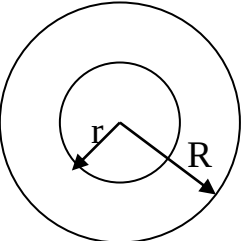
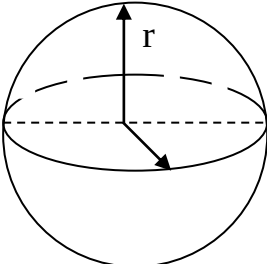
Фигура	Площадь	Фигура	Объём
1. Треугольник 	$S = \frac{1}{2} ah$	1. Прямая призма 	$V = S_{осн} \cdot h$ $V = a \cdot b \cdot h$
2. Параллелограмм 	$S = ah$	2. Цилиндр прямой круговой 	$V = S_{ин} \cdot h$ $V = \frac{\pi d^2}{4} \cdot h$
3. Трапеция 	$S = \frac{1}{2} (a_1 + a_2) \cdot h$	3. Полый цилиндр (трубка) 	$V = S_{ин} \cdot h$ $V = \frac{\pi (D^2 - d^2) \cdot h}{4}$
4. Круг 	$S = \pi \cdot r^2$	4. Конус прямой круговой 	$V = \frac{S_{осн} \cdot h}{3}$ $V = \frac{\pi d^2 h}{12}$
5. Кольцо 	$S = \pi (R^2 - r^2)$	5. Шар 	$V = \frac{4}{3} \pi r^3$ $V = \frac{1}{6} \pi d^3$

Таблица 2

Ускорение свободного падения g на различной высоте h над Землёй

h , км	g , м/с ²	h , км	g , м/с ²	h , км	g , м/с ²
0	9,8066	8	9,7820	100	9,505
1	9,8036	10	9,7759	120	9,447
2	9,8005	15	9,7605	500	8,45
3	9,7974	20	9,7452	1000	7,36
4	9,7943	50	9,6542	10000	1,5
5	9,7912	80	9,5644	50000	0,125
6	9,7882			400000	0,0025

Таблица 3

Ускорение свободного падения g на поверхности некоторых небесных тел

Планета	g , м/с ²	Планета	g , м/с ²
Луна	1,62	Сатурн	10,44
Меркурий	3,68-3,74	Земля	9,81
Марс	3,86	Нептун	11,09
Уран	8,86	Юпитер	23,95
Венера	8,88	Солнце	273,1

Таблица 4

Динамическая вязкость

Жидкости (при 20° С)	η , мПа·с	Газы (при 20° С и 101,3 кПа)	η , мПа·с
Ацетон	0,322	Азот	0,0175
Бензин	0,53	Аммиак	0,00995
Вода	1,002	Водород	0,0088
Глицерин	1480	Воздух	0,0182
Керосин	1,8	Гелий	0,0196
Масло касторовое	242	Двуокись углерода	0,0147
Масло моторное смазочное	30-6000	Кислород	0,0202
Ртуть	1,554	Метан	0,0108
Смола	$3 \cdot 10^{10}$	Окись углерода	0,0177
Этиловый спирт	1,20		

Таблица 5

Модуль продольной упругости

<i>Вещество</i>	<i>Е, ГПа</i>	<i>Вещество</i>	<i>Е, ГПа</i>
Алюминий	71	Магний	43
Берёза (вдоль волокон)	18	Медь	123
Бетон	10-30	Паутина	3
Вольфрам	410	Плексиглас	3,2
Дуб	14	Полистирол	3,2
Дюралюминий	73	Свинец	16
Железо	210	Серебро	79
Иридий	528	Сосна	12
Кирпичная кладка	3	Сталь	210-280
Константан	163	Стекло	50-80
Латунь	98	Фарфор	58
Лёд(при 0° С)	3	Шёлковая нить	6,5

Таблица 6

Ускорение свободного падения для некоторых городов

<i>Город</i>	<i>Географические координаты (по Гринвичу)</i>		<i>h, м над уровнем моря</i>	<i>g, м/с²</i>
	<i>Долгота</i>	<i>Широта</i>		
Берлин	13,40 в.д.	52,50 с.ш.	40	9,81280
Благовещенск	127,33 в.д.	50,15 с.ш.	137	9,81053
Вашингтон	77,01 з.д.	38,89 с.ш.	14	9,80112
Вена	16,36 в.д.	48,21 с.ш.	183	9,80860
Гринвич	0,0 в.д.	51,48 с.ш.	48	9,81188
Киев	30,30 в.д.	50,27 с.ш.	179	9,81054
Мадрид	3,69 в.д.	40,41 с.ш.	655	9,79981
Москва	37,61 в.д.	55,75 с.ш.	151	9,8154
Нью-Йорк	73,96 з.д.	40,81 с.ш.	38	9,80247
Одесса	30,73 в.д.	46,47 с.ш.	54	9,80735
Париж	2,34 в.д.	48,84 с.ш.	61	9,80943
Прага	14,39 в.д.	50,09 с.ш.	297	9,81014
Рим	12,99 в.д.	41,54 с.ш.	37	9,80312
Стокгольм	18,06 в.д.	59,34 с.ш.	45	9,81843
Токио	139,80 в.д.	35,71 с.ш.	18	9,79801

Таблица 7

Эффективный диаметр молекулы d , нм

<i>Вещество</i>	<i>Диаметр, нм</i>	<i>Вещество</i>	<i>Диаметр, нм</i>
Азот	0,3	Гелий	0,19
Водород	0,26	Кислород; водяной пар	0,29; 0,23

Таблица 8

Средняя длина свободного пробега молекул λ , нм

<i>Газ</i>	<i>$t = 0^\circ \text{C};$ $p = 760 \text{ мм.рт.ст.}$ <i>(101325 Па)</i></i>	<i>Газ</i>	<i>$t = 0^\circ \text{C};$ $p = 760 \text{ мм.рт.ст.}$</i>
Азот	59,9	Водород	112,3
Воздух	60,8; 62,1 (при 20°C)	Кислород	64,7

1 мм.рт.ст. = 133,3 Па

Таблица 9

Теплопроводность некоторых веществ, Вт/м К

<i>Вещество</i>	<i>Коэффициент теплопроводности</i>	<i>Вещество</i>	<i>Коэффициент теплопроводности</i>
Алюминий	211	Кирпич	0,63-0,84
Бетон	0,84-1,3	Медь	385
Дерево	0,13-0,42	Стекло	0,59
Вода	0,6	Сталь	46
Железо	71	Ртуть	7,9
Земля	0,42-2,1		

Таблица 10

Плотность и удельная теплоёмкость при 20 °С (если не указано другое).

<i>Вещество</i>	<i>Плотность, 10^{-3} кг/м³</i>	<i>Уд. теплоёмкость при 20 °С, кДж / (кг·К)</i>
<i>Жидкости</i>		
Ацетон	0,79	2,160
Бензин	0,70	2,05
Вода (морская 0,5%;3%; 6%)	1 ,00 (1,01;1,03;1,05)	4,18-4,22 4,1; 3,93; 3,78
Глицерин	1,26	2,66
Гудрон	0,99	2,09
Керосин	0,8-0,9	1,88-2,14
Кислота азотная;серная;соляная;	1,52; 1,83; 1,07	3,10; 1,34; 1,93
Масло моторное	0,8-0,9	1,67-2,01
Масло оливковое и подсолнечное	0,89	1,84
Молоко	1,02	3,93
Нефть	0,80	1,67-2,09
Пиво	1,01	3,85
Ртуть	13,60	0,13
Спирт метанол; нашатырный; этанол	0,79; <1; 0,79	2,47; 4,73; 2,39
<i>Твёрдые вещества</i>		
Асфальт	1,4	0,92
Алюминий	2,7	0,92
Базальт	3,0	0,84
Бетон	я 1,8-2,2 (до 2,7)	1,00
Вольфрам	19,1-19,3	0,15
Гипс	2,3	1,09
Глина	2,3-2,4	0,88
Гранит	2,7-2,8	0,75
Графит	2,3	0,84
Грунт песчаный	1,5-2,0	1,10-3,32
Дерево (дуб); (пихта, кедр); (сосна); (берёза); (липа)	0,74-0,8;0,5- 0,6;0,5;0,7;0,4	2,4; 2,7; 2,7; 2,4;2,6
Железо	7,8	0,46
Земля вл.; сух.	1,9-2,0; 1,4-1,6	2,0; 0,84
Зола	0,75	0,80
Золото	19,3	0,13
Известь	0,4-0,7	0,84
Камень	1,8-3	0,84-1,26
Картон сухой	-	1,34
Кварц		0,75

Продолжение таблицы 10

<i>Вещество</i>	<i>Плотность, 10^3 кг/м³</i>	<i>Уд. теплоёмкость при 20 °С, кДж/(кг·К)</i>
Кирпич	1,8	0,85
Кожа	2,65	1,51
Лёд (0°С)	0,92	2,11
Лёд сухой (СО2 твёрдый)	1,97	1,38
Латунь	8,5	0,38;05
Медь, никель	8,9	0,38
Мрамор	2,7	0,92
Олово	7,3	0,25
Парафин	0,9	2,89
Полиэтилен	0,90-0,97	2,0-2,3
Полистирол	1,05	1,38
Полиуретан	1,1-1,2	1,38
Пробковая кора	0,15- 0,25	2,05
Резина твёрдая	0,9-1,3	1,42
Свинец	11,3	0,13
Серебро	10,5	0,25
Соль поваренная	2,2	0,88
Сталь	7,7-7,8	0,46
Стекло оконное	2,5	0,67
Тело человека	1,05	3,47
Уголь каменный (0-100 °С)	1,3-1,6	1,17-1,26
Фарфор	2,3	0,8
Цемент	3,1	0,8
Цинк	7,1	0,4
Чугун	7,4	0,54
Шерсть	-	1,8
Эбонит	1,2	0,59
<i>Газы</i>		
Воздух	0,00129	
Кислород	0,00143	
Угл. газ	0,00198	

Таблица 11

<i>Физическая постоянная</i>	<i>Обозначение</i>	<i>Числовые значения</i>
Гравитационная постоянная	G	$6,67 \cdot 10^{-11}$ м ³ / (кг · с ²)
Число Авогадро	N _A	$6,02 \cdot 10^{23}$ моль ⁻¹
Молярная газовая постоянная	R	8,31 Дж/(моль · К)
Постоянная Больцмана	k	$1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К
Число Лошмидта	N _L	$2,686754 \cdot 10^{25}$ м ⁻³

Список литературы

1. Александров В.Н., Каменецкая М.С., Смирнов К.В. Частные вопросы курса физики/ В.Н. Александров , М.С. Каменецкая , К.В. Смирнов. - М.: 2010. – 196 с.
2. Бачище, А.В. Лабораторный практикум по физике: Механика. Молекулярная физика. Термодинамика/ А.В. Бачище, С.А. Баляева, А.Н. Углова и др.– Новороссийск: НГМА, 2002.– 96 с.
3. Бытько Н.Д. Физика части 1 и 2/ Н.Д.. Бытько – М.: Изд-во «Высшая школа», 1972. – 336 с.
4. Волков А.Ф., Лумпиева Т.П. Лабораторный практикум по физике/А.Ф.Волков, Т.П. Лумпиева - Донецк: ДонНТУ, 2011.-.389 с.
5. Геворкян Р.Г. Курс общей физики/ Р.Г. Геворкян, В.В. Шепель. - М.: Изд-во «Высшая школа», 1972. – 599с.
- 56 Грабовский, Р.И. Курс физики / Р.И. Грабовский. – М.: Изд-во «Высшая школа», 2000.—348с.
7. Детлаф А. А. Курс физики : Учебное пособие для вузов / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский. – 6-е изд., стереотип. – М. : Академия, 2007. – 719с.
4-е изд.- М.: ФИЗМАТЛИТ; Изд-во МФТИ, 2005. - 560 с.
8. Енохович А.С. Краткий справочник по физике/ А.С. Енохович – М.: «Высшая школа», Типография Анохина, г. Петрозаводск 1976.- 288с.
9. Ивлиев А.Д. Физика. Учебное пособие для вузов./ А.Д. Ивлиев.-СПб.: Издательство«Лань», 2008.-672с.
10. Иродов И. Е. Задачи по общей физике: Учебное пособие для вузов / И. Е. Иродов. – 7-е изд., стереотип. – М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007. – 431 с.
11. Исаков А.Я. Физические основы механики. Руководство по самостоятельной работе / А.Я. Исаков.- Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2007. - 343 с.
12. Калашников Н.П., Калашникова Н.М. Интернет-тестирование базовых знаний. СПб.: Издательство «Лань», 2009, 2010.-145с., 148с.
13. Кассандрова О.Н. Лебедев В.В. Обработка результатов наблюдений М.: Книга по Требованию, 2012. – 144 с. ISBN 978-5-458-41246-9 Москва., «Книга по Требованию»
14. Кириллов В.М. Решение задач по физике : Учебное пособие для вузов / В. М. Кириллов . – 2-е изд., испр. и доп. – М. : КомКнига, 2006. – 245с.

15. Кухлинг Х. Справочник по физике/ Х. Кухлинг.– М.: Изд-во «Мир», 2005.-519с.
16. Лабораторный практикум по физике Под ред. Ахметова А.С.-Высшая школа, 2002.-704 с.
17. Лабораторный практикум по физике. Под ред. Гольдина Л.М.-М.: Наука, 2005.- 704 с.
18. Лабораторный практикум по физике. Механика. Молекулярная физика. Методические указания к лабораторным работам. Омск.: ОмГТУ, 2006, 2008.- 41 с., 48с.
19. Лабораторный практикум по физике. Молекулярная физика. Под ред. Афанасьева А.Д. – Иркутск. ИрГУ,2003.- 157 с.
20. Майсова Н.Н. Практикум по курсу общей физики / Н. Н. Майсова – М.: Книга по Требованию, 2012. – 443 с. ISBN 978-5-458-41246-9 Москв., «Книга по Требованию»
21. Стрелков С.П. Механика / С. П. Стрелков. – М. : Лань, 2006. – 240 с. Сборник задач по общему курсу физики : в 5 кн. / ред. И. А. Яковлев. – 5-е изд., – М. : Физматлит, 2006.- 243с.
22. Савельев И.В. Курс физики/ И.В.Савельев.-М.: Наука, 2003.-483 с. Сивухин Д.В. Общий курс физики. В 5 т. Том I. Механика/Д.В. Сивухин .-М.: Наука, 2008.-583 с.
23. Трофимова Т. И. Курс физики : учебное пособие для вузов / Т. И. Трофимова. – 18-е изд., стереотип. – М. 2010. – 557с.
24. Физика: теория и технология решения задач / под общей редакцией В.А. Яковенко. – Мн.: НТООО «ТетраСистемс», 2003.
25. Физика Задачник-практикум. Под ред. Канд. Пед.наук С.У Гончаренко/ - Киев Головное издательство. Издательство объединений «Высшая школа», 2004.- 357с.
26. Чертов А. Г. Задачник по физике : Учебное пособие для втузов / А. Г. Чертов, А. А. Воробьев. – 8-е изд., перераб. и доп. – М. : Физматлит, 2007. – 640 с.
27. Чертов А.Г. Физические величины./А.Г. Чертов-М.: Высшая школа,2009.-333с.
28. Эссаулова И.А. Руководство к лабораторным работам по физике/ И.А. Эссаулова, М.Е. Блохина, Л.Д. Гонцов.- М.: «Высшая школа», 2002. – 271 с.

Содержание

1. Введение	4
2. Классификация погрешностей	5
3. Применение теории погрешностей для обработки результатов измерений в физической лаборатории	10
4. Значение коэффициента Стьюдента	11
5. Лабораторная работа 1.0 Определение плотности твёрдого тела правильной геометрической формы	12
6. Лабораторная работа 1 (образец оформления отчёта) Определение плотности твёрдого тела правильной геометрической формы.	14
7. Лабораторная работа 2 Определение модуля упругости методом изгиба (модуля Юнга)	16
8. Лабораторная работа 3 Изучение законов и определение характеристик вращательного движения твёрдого тела (маятник Обербека)	21
9. Лабораторная работа 4 Изучение колебаний пружинного маятника	26
10. Лабораторная работа 5 Определение момента инерции физического маятника	30
11. Лабораторная работа 6 Определение коэффициента трения качения методом наклонного маятника	34
12. Лабораторная работа 7 Определение ускорения свободного падения тел на примере математического маятника	40
13. Лабораторная работа 8 Определение коэффициента вязкости жидкости методом Стокса	44
14. Лабораторная работа 9 Определение коэффициента теплопроводности материала	51
15. Лабораторная работа 10 Определение влажности воздуха	56
16. Лабораторная работа 11 Определение отношения удельных теплоёмкостей газа и расчёт изменения энтропии при различных процессах	63
17. Лабораторная работа 12 Опытная проверка закона нормального распределения случайных величин (доска Гальтона)	71
18. Лабораторная работа 13 Определение средней длины свободного пробега и эффективного диаметра молекул по явлению внутреннего трения	79
19. Индивидуальные задания по теории погрешности	86
20. Тестовые задания	89
21. Примеры решения задач	107
22. Задачи для самостоятельного решения	110
23. Глоссарий	112
24. Основные законы, определения и формулы, используемые в работах	120
25. Наименование величин, обозначения, единицы физических величин	127
26. Вопросы к зачёту и экзамену	131
27. Приложения	133
28. Список литературы	139
29. Содержание	141

*Сергеева Виктория Васильевна,
Чуйкова Светлана Юрьевна*

МЕХАНИКА И МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

Учебное пособие

Лицензия ЛР 020427 от 25.04.1997 г.

Подписано к печати 25.02.2014 г. Формат 60×90/16.

Уч.-изд.л. – 4,5. Усл.-п.л. – 9,0.

Тираж 300 экз. Заказ 58.

Отпечатано в отделе оперативной полиграфии издательства ДальГАУ
675005, г. Благовещенск, ул. Политехническая, 86

