

Федеральное агентство по образованию
Пермский государственный технический университет
Кафедра «Динамика и прочность машин»

Е.В. Кузнецова

СПЕЦИАЛЬНЫЕ РАЗДЕЛЫ ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ

Утверждено Редакционно-издательским советом
университета в качестве учебно-методического пособия

Издательство
Пермского государственного технического университета
2006

УДК 50

К 26

Рецензенты: профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой «Информатика и искусственный интеллект» (Пермский государственный педагогический университет) *Л.Н. Ясницкий*;
кандидат физико-математических наук, профессор кафедры «Динамика и прочность машин» *А.А. Лежнева* (Пермский государственный технический университет).

Кузнецова Е.В.

К26 Специальные разделы естествознания: учебно-методическое пособие / Е.В. Кузнецова. – Пермь: Издательство Перм. гос. техн. ун-та, 2006. – 88 с.
ISBN 5-88151-574-9

Приведены общие сведения, понятия, определения, характеристики и формулы, а также законы, необходимые для решения задач по программе «Специальные разделы естествознания» специальности «Динамика и прочность машин». Даны методические указания к проведению лабораторных работ. Теоретические положения по оценке точности экспериментальных данных проиллюстрированы примерами.

ISBN 5-88151-574-9

© ГОУ ВПО «Пермский государственный
технический университет», 2006

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время необходимы новые подходы и методики преподавания разделов естествознания в технических высших учебных заведениях. Особенно актуальными становятся эти вопросы в условиях вариативности школьного образования. Чем больше различия в школьных программах, тем сложнее оптимизировать программу по разделам естествознания. Многие учебники для вузов под названием «Концепции современного естествознания» разных авторов в основном рекомендованы для гуманитарных специальностей.

В Пермском государственном техническом университете (ПГТУ) отдельные разделы естествознания (математика, физика, химия и т.д.) разработаны в соответствии с государственными требованиями к минимуму содержания и уровню подготовки выпускников по направлениям подготовки дипломированных специалистов (651500 – Прикладная механика, 071100 – Динамика и прочность машин (ДПМ)). Все разделы обычно преподаются конкретизированно, без обобщений, что затрудняет понимание основных концепций, определений и понятий современного естествознания. Поэтому для лучшего освоения предметов естествознания необходимо вводить дополнительные дисциплины, дополняющие учебные программы, обобщающие известные характеристики и предметы, а также восполняющие некоторые пробелы до вузовского образования.

В учебный план I курса по специальности «Динамика и прочность машин» ПГТУ несколько лет назад была введена новая дисциплина «Специальные разделы естествознания» из цикла «Региональный компонент (по выбору)». В связи с этим разработана лекционная программа, а также ряд практических и лабораторных работ, с учетом многолетнего опыта оценки образовательного уровня студентов, а также рекомендаций преподавателей кафедры ДПМ.

Апробирование программы выявило недостатки и пробелы представления предметов естествознания в школах. Например, при изучении истории развития естествознания, основных этапов и естественно-научных открытий далеко не все студенты имели представления по этим вопросам. На практических занятиях при решении задач с использованием основных законов физики, механики, химии и т.д. студенты испытывали затруднения или вообще не знали некоторые понятия, например, не изучали колебательные процессы. Такие пробелы знаний у студентов, изучающих динамику и прочность машин и механизмов, не допустимы.

Динамика и прочность машин – исследовательская специальность, в которой реализована идея объединения университетского образования по принципу сочетания фундаментального физико-математического образования с практической инженерной подготовкой. Студенты с первых курсов занимаются научно-исследовательской работой, проходят практику на машиностроительных предприятиях и в академических институтах. Наши выпускники – это высококвалифицированные специалисты в области технических наук, с применением теоретических, численных и экспериментальных методов исследования надежности и безопасности машин, конструкций, приборов и различных механизмов современной техники.

На кафедре ДПМ существует достаточно большая лабораторная база для проведения экспериментальных исследований различного рода: механических и физических свойств материала, напряженно-деформированного состояния детали, динамических характеристик системы, а также исследование феномена упругости, пластичности и ползучести. При этом предполагается, что студент должен уметь обрабатывать экспериментальные данные, оформлять лабораторные работы, иметь представление о погрешностях измерений и т.д. К сожалению, как показывает практика, такие знания у студентов отсутствуют, по всей видимости, из-за недостатка или отсутствия лабораторных практикумов по предметам естествознания в школах.

Специалист по ДПМ должен исследовать надежность, ресурс и безопасность машин, конструкций и приборов, создавать и развивать аналитические и численные методы расчета новой техники и технологии из современных конструкционных материалов. При этом необходимо изучение методов математического моделирования реальных процессов и навыки применения вычислительной техники в инженерных расчетах, что невозможно без определенных навыков использования ЭВМ. Такие навыки у многих студентов отсутствуют, что объясняется недостатком современной компьютерной техники и программного обеспечения в школах. Эти и другие проблемы можно решать путем дополнения учебных программ в высших технических учреждениях. При этом необходимо учитывать специфику того или иного образования, особенности специальности, а также общий образовательный уровень студентов.

В данной работе приведены общие сведения, понятия, определения, характеристики и законы по программе «Специальные разделы естествознания» специальности «Динамика и прочность машин». Представлены теоретические положения по оценке точности экспериментальных данных, которые

иллюстрируются примерами. Для лучшего усвоения теоретического материала студентам предлагается выполнить ряд практических и лабораторных работ

1. РЕАЛИЗАЦИЯ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАДАНИЙ ПО РАЗДЕЛАМ ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ

При решении задач необходимо установить, какие законы и закономерности лежат в основе рассматриваемой задачи. Затем, воспользовавшись формулами, найти решение задач в общем виде. После чего подставить численные значения данных величин в одной и той же системе единиц. Соотношения между единицами СИ и единицами других систем приведены в приложении. В некоторых случаях нет необходимости все данные выражать в одной и той же системе. Например, если в формуле какая-либо величина в одной и той же системе входит множителем в числитель и знаменатель, то безразлично в каких единицах измерения выражать эту величину, необходимо только, чтобы единицы были одинаковы.

При вычислениях следует обращать внимание на точность окончательного результата, которая должна соответствовать точности исходных величин. Завышение точности в расчетах приведет только к лишнему загромождению математических операций.

В окончательном ответе после численного значения следует писать наименование единицы. Правильность полученного ответа в определенной степени можно проверить в результате анализа размерности найденной величины.

Темы разделов для решения задач:

- **Нерелятивистское движение.**
- **Гравитационное взаимодействие.**
- **Законы сохранения.**
- **Тепловые процессы.**
- **Электромагнитные явления.**
- **Колебательные и волновые процессы.**
- **Релятивистское движение.**
- **Корпускулярно-волновые свойства.**

1.1. Нерелятивистское движение

Нерелятивистским называют движение тел со скоростью, значительно меньшей скорости света в вакууме. Такое движение описывается законами классической механики.

Скорость прямолинейного движения: $v = \frac{ds}{dt}$;

Его средняя скорость $\langle v \rangle = \frac{s}{t} = \text{const}$;

Ускорение прямолинейного движения $a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2s}{dt^2}$;

Его среднее значение $\langle a \rangle = \frac{v - v_0}{t}$,

где v_0 – скорость в начальный момент времени.

Для прямолинейного равнопеременного движения

$$s = v_0 t + \frac{at^2}{2}, \quad v = v_0 + at, \quad a = \text{const}.$$

В этих уравнениях ускорение a положительно при равноускоренном движении и отрицательно при равнозамедленном.

Скорость сложного движения равна векторной сумме скоростей слагаемых движений,

$$v = \sum_{i=1}^n v_i.$$

При криволинейном движении полное ускорение $a = \sqrt{a_t^2 + a_n^2}$,

где $a_t = \frac{dv}{dt}$; $a_n = \frac{v^2}{r}$; где r – радиус кривизны траектории в данной точке.

При вращательном движении угловая скорость $\omega = \frac{d\varphi}{dt}$.

Угловое ускорение $\varepsilon = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\varphi}{dt^2}$.

Для равномерного вращательного движения угловая скорость

$$\omega = \frac{\varphi}{t} = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu,$$

где T – период вращения, ν – частота вращения, т.е. число оборотов в единицу времени.

Угловая скорость ω связана с линейной скоростью v соотношением

$$v = \omega R.$$

Тангенциальное и нормальное ускорения при вращательном движении определяются соответственно формулами: $a_t = \varepsilon R$, $a_n = \omega^2 R$.

Основной закон динамики (второй закон Ньютона) описывается уравнением

$$F dt = d(mv).$$

Если масса постоянна, то $F = m \frac{dv}{dt} = ma$, где a – ускорение, приобретенное телом массы m под действием силы F .

Обычно учитывают результирующую силу, которая определяется по

правилу сложения векторов:

$$F = \sum_{i=1}^n F_i.$$

Сила трения скольжения $F = kF_n$, где k – коэффициент трения; F_n – нормальная составляющая силы, действующая на тело, движущееся по кривой, $F_{ц} = \frac{mv^2}{R}$, где m – масса тела, v – его скорость, R – радиус кривизны траектории.

Задачи по разделу «Нерелятивистское движение»

1. За время $t = 7$ с тело, двигаясь равноускоренно из состояния покоя, прошло расстояние $S_0 = 480$ м. На каком расстоянии S от начального положения оно находилось через $t_1 = 5$ с после начала движения?

2. Зависимость пройденного пути от времени задается уравнением $S = A + Bt + Ct^2 + Dt^3$, где $C = 0,1$ м/с², $D = 0,3$ м/с³. Определить: 1) через какое время после начала движения ускорение a тела будет равно 2 м/с²; 2) среднее ускорение $\langle a \rangle$ тела за этот промежуток времени.

3. Пассажир электропоезда, движущегося со скоростью $v_1 = 16$ м/с, заметил, что встречный поезд длиной 200 м прошел мимо него за 6 с. Определите скорость движения v_2 встречного поезда.

4. Поезд движется со скоростью 35 км/ч. Если выключить ток, то поезд остановится через 19 с. Найти: ускорение торможения; расстояние, пройденное им за время торможения.

5. Определите время подъема из метро пассажира, стоящего на эскалаторе, если при одинаковой скорости относительно ступенек по неподвижному эскалатору он поднимается за $t_1 = 2,5$ мин, а по движущемуся – за $t_2 = 35$ с.

6. Во сколько раз время движения моторной лодки против течения больше времени движения по течению, если лодка плывет по реке из одного пункта в

другой и обратно при скорости течения $v_1 = 3$ м/с. Скорость лодки в стоячей воде $v_2 = 12$ м/с.

7. Чему равно время полета самолета при попутном ветре между двумя пунктами, расположенными на расстоянии 980 км, если дует встречный ветер со скоростью $v_1 = 25$ м/с, а средняя скорость самолета относительно воздуха $v_2 = 250$ м/с?

8. Определите время подъема лифта в высотном здании, считая его движение при разгоне и торможении равнопеременным с ускорением a , равным по абсолютной величине 1 м/с, а на среднем участке – равномерным со скоростью $v = 2$ м/с. Высота подъема $h = 61$ м.

9. Колесо вращается с постоянным угловым ускорением 2 рад/с². Через 0,5 с после начала вращения полное ускорение колеса стало равно 14 м/с². Найти радиус колеса.

10. Диск, вращаясь равноускоренно, достиг угловой скорости $\omega = 21$ рад/с, совершив $n = 10$ полных оборотов после начала вращения. Найдите угловое ускорение диска.

11. Сколько оборотов сделают колеса автомобиля после включения тормоза, если в начальный момент торможения автомобиль имел скорость $v_0 = 68$ км/ч и остановился за время $t = 4$ с после начала торможения? Диаметр колес $D = 0,8$ м. Чему равно среднее угловое ускорение колес при торможении?

12. Автомобиль весом $6 \cdot 10^4$ Н, движущийся по инерции со скоростью 12 м/с, вследствие трения остановился за 24 с. Определите силу трения.

13. Определите массу движущегося прямолинейного тела, которое под действием силы 35 Н через 6 с после начала движения изменяет свою скорость от 14 до 28 м/с.

14. Чему равен коэффициент трения колес автомобиля о дорогу, если при скорости автомобиля 11 м/с тормозной путь равен 8,5 м?

15. Поезд массой 520 т после прекращения тяги тепловоза под действием силы трения 10^5 Н останавливается через 1,2 мин. С какой скоростью шел поезд?

16. Тело массой $m = 0,6$ кг движется прямолинейно, причем зависимость пройденного пути S от времени t задается уравнением $S = A - Bt + Ct^2 - Dt^3$, где $C = 5$ м/с² и $D = 1$ м/с³. Найдите силу, действующую на тело в конце первой секунды движения.

17. По наклонной плоскости, расположенной под углом $\alpha=32^\circ$ к горизонту, скользит тело. Найдите его ускорение, если коэффициент трения f равен 0,3.

18. Из орудия вылетает снаряд массой 11 кг со скоростью 520 м/с. Найдите силу давления пороховых газов, считая ее постоянной во все время – равное 0,02 с движения снаряда внутри ствола орудия.

20. Два груза с массами $m_1=2$ кг и $m_2=1$ кг соединены нитью и перекинуты через невесомый блок. Найти: 1) ускорение, с которым движутся грузы; 2) натяжение нити. Трением в блоке пренебречь.

1.2. Гравитационное взаимодействие

Гравитационное взаимодействие описывается законом всемирного тяготения тел, размеры которых малы по сравнению с расстоянием между ними.

Две материальные точки притягиваются друг к другу с силой $F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$, где

m_1 и m_2 – массы взаимодействующих материальных точек; r – расстояние между ними; $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ н} \cdot \text{м}^2 / \text{кг}^2$ – гравитационная постоянная. Данный закон справедлив и для однородных шаров; при этом r – расстояние между их центрами.

Движение спутников (в том числе и искусственных) вокруг планет и планет вокруг Солнца описывается законами Кеплера:

- планеты движутся вокруг Солнца по эллипсам, в одном из фокусов которых находится Солнце;
- радиус-вектор, проведенный от Солнца к планете, в равные отрезки времени описывает равные площади;
- квадраты времени обращения планет относятся друг к другу как кубы

больших полуосей их орбит:
$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{R_1^3}{R_2^3}.$$

В случае круговой орбиты роль большой полуоси играет радиус орбиты.

Задачи по разделу «Гравитационное взаимодействие»

1. Определите силу притяжения между космонавтом массой $m_1=72$ кг и космическим кораблем массой $m_2=22$ т. Космонавт находится в космосе на

расстоянии 6 м от центра космического корабля. Какое ускорение способна сообщить сила притяжения космонавту?

2. Какой должна быть скорость тела, чтобы оно могло удалиться от поверхности Луны в бесконечность? Масса Луны $M_{\text{л}}=7,3 \cdot 10^{22}$ кг; радиус Луны $R_{\text{л}}=1740$ км.

3. Найдите скорость, которую надо сообщить телу у поверхности Земли в горизонтальном направлении, чтобы оно начало двигаться вокруг Земли по круговой орбите в качестве ее спутника, т.е. численное значение первой космической скорости.

4. При условии, что масса Земли равна $M_3=5,6 \cdot 10^{24}$ кг, расстояние между Луной и Землей – $R=3,844 \cdot 10^8$ м. Определите линейную скорость движения Луны вокруг Земли, считая, что Луна движется по круговой орбите.

5. Определите массу Земли, если искусственный спутник имеет период обращения 1ч 46 мин и запущен на высоту 10^6 м.

6. Если расстояние между Землей и Солнцем $1,5 \cdot 10^{11}$ м, тогда с какой линейной скоростью движется Земля вокруг Солнца, масса которого $1,97 \cdot 10^{30}$ кг?

7. Масса Луны в 81 раз меньше массы Земли, а расстояние между их центрами в 60 раз больше радиуса Земли. На каком расстоянии от центра Земли космическая ракета, движущаяся к Луне, будет притягиваться Луной и Землей с одинаковой силой?

8. Во сколько раз сила тяжести на Земле больше, чем на Марсе, если диаметр Марса в 1,9 раз меньше диаметра Земли, а его масса в 10 раз меньше земной?

9. Насколько увеличится вес тела на уровне моря по сравнению с его значением на горной вершине высотой $h=6000$ м?

10. На какой высоте ускорение силы тяжести вдвое меньше его значения на поверхности Земли?

11. Планета имеет два спутника. Первый находится на расстоянии $R_1=9200$ км, второй – на расстоянии $R_2=23000$ км от центра планеты. Найдите периоды обращения этих спутников вокруг планеты.

12. Какое линейное ускорение получает Земля под действием силы притяжения ее Солнцем?

1.3. Законы сохранения

Работа силы F при перемещении тела S выражается формулой

$$A = \int_S F_S dS,$$

где F_S – проекция силы на направление пути, dS – величина участка пути.

Если сила постоянна и действует под не изменяющимся углом α к перемещению S , то $A = F_S \cos \alpha \cdot S$.

Мощность определяется формулой $N = \frac{dA}{dt}$.

При постоянной мощности $N = \frac{dA}{dt} = F_S v$,

где v – скорость, A – работа, совершаемая за время t

Кинетическая энергия тела массой m , движущегося со скоростью v , равна

$$W_k = \frac{mv^2}{2}.$$

Потенциальная энергия тела массой m , поднятого на высоту h над поверхностью Земли, $W_{\text{п}} = mgh$, где g – ускорение свободного падения.

Полная энергия в замкнутой системе, равная сумме потенциальной и кинетической энергии, постоянная величина (закон сохранения механической энергии);

$$W = W_k + W_{\text{п}} = \text{const}.$$

Импульс всех входящих в нее тел в замкнутой системе остается неизменным – закон сохранения импульса

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 + \dots + m_n v_n = \text{const}.$$

Основное уравнение динамики вращательного движения твердого тела

$$M dt = d(I\omega),$$

где M – момент силы; $I\omega$ – момент импульса (ω – угловая скорость; I – момент инерции).

Если за время действия момента сил момент инерции не меняется, то основное уравнение динамики вращательного движения имеет вид:

$$M = I \frac{d\omega}{dt} = I\varepsilon,$$

где ε – угловое ускорение.

Ниже даны формулы моментов инерции некоторых тел:

1. Стержня массой m и длиной l относительно оси, проходящей через

его центр масс перпендикулярно его длине: $I = \frac{ml^2}{12}$.

2. Материальной точки массой m на расстоянии R от оси вращения: $I = mR^2$; если ось проходит через конец стержня перпендикулярно его длине, то

$$I = \frac{ml^2}{3}.$$

3. Цилиндра или диска радиусом R и массой m относительно оси, проходящей через центр масс перпендикулярно основанию: $I = \frac{mR^2}{2}$.

4. Шара массой m относительно оси, проходящей через его центр:

$$I = \frac{2mR^2}{5}.$$

5. Тонкостенной трубы или кольца относительно оси, совпадающих с их осью,

$$I = mR^2.$$

Теорема Штейнера: $I = I_0 + ma^2$, где I – момент инерций тела относительно любой оси, которая параллельна данной и находится на расстоянии a ; I_0 – момент инерции тела относительно оси, проходящей через центр масс; m – масса тела.

Момент импульса L твердого тела равен сумме моментов импульса отдельных частиц: $L = \sum_{i=1}^n m_i v_i r_i$, где v_i – линейная скорость; i -й частицы массой m_i , находящейся на расстоянии r_i от оси вращения.

Момент импульса для замкнутой системы не изменяется с течением времени.

$$L = \sum_{i=1}^n I_i \omega_i = \text{const.}$$

Кинетическая энергия вращающегося тела $W_k = \frac{I\omega^2}{2}$.

Кинетическая энергия тела, которое совершает поступательное и вращательное движение, $W_k = \frac{mv_c^2}{2} + \frac{I\omega^2}{2}$, где I – момент инерции относительно оси; v_c – скорость поступательного движения центра масс; m – масса тела; ω – угловая скорость вращения вокруг той же оси.

Задачи по разделу «Законы сохранения»

1. Какую работу необходимо совершить, чтобы тело массой 5 т отправить в межпланетное пространство с поверхности Земли.

2. Груз массой $m=10$ кг поднимают по наклонной плоскости с углом наклона $\alpha = 45^{\circ}$. Найдите работу, совершаемую при подъеме на расстояние $S=2$ м, если время подъема $t=2$ с, а коэффициент трения $k = 0,15$.

3. При движении тела массой $m=1$ кг действует постоянная сила трения 0,2 кгс. Какую работу надо совершить, чтобы увеличить скорость движения тела от 2 до 6 м/с на пути 11 м?

4. Какой кинетической энергией обладало тело массой 2 кг, если оно поднялось по наклонной плоскости с углом наклона 30° на высоту 1 м. Коэффициент трения между телом и наклонной плоскостью 0,1.

5. Определите мощность двигателя подъемного крана, поднимающего груз массой $m=3,1$ т с постоянной скоростью 7 м/мин, если КПД крана 85 %.

6. Кинетическая энергия снаряда при вылете из орудия равна 7 МДж. Масса орудия 5 т, масса снаряда 95 кг. Какая кинетическая энергия сообщается орудию вследствие отдачи?

7. На подножку вагонетки, которая движется прямолинейно со скоростью 1 м/с, прыгает человек массой $m_2=65$ кг в направлении, перпендикулярном ходу вагонетки. Масса вагонетки $m_1=250$ кг. Определите скорость вагонетки вместе с человеком.

8. На какое расстояние сместится неподвижно стоящая на воде лодка, если человек массой $m_1=75$ кг пройдет с носовой части лодки на корму? Длина лодки 2,5 м, ее масса $m_2=110$ кг. Соппротивлением воды пренебречь.

9. Тело массой 4 кг движется со скоростью 5 м/с и ударяется о неподвижное тело такой же массы. Считая удар центральным и упругим, определите количество теплоты, выделившееся при ударе.

10. Во сколько раз уменьшится кинетическая энергия нейтрона при ударе, если нейтрон массой m_0 ударяется о неподвижное ядро атома углерода ($m=12 m_0$). Удар считать центральным и упругим.

11. Мяч массой 140 г, движущийся со скоростью 5 м/с, ударяется о стенку так, что угол между вектором скорости до и после удара равен 60° . Считая удар упругим, определите продолжительность удара, если сила удара равна 20 Н.

12. Определите момент инерции шара радиусом 0,15 м и массой 5 кг относительно оси, совпадающей с касательной к его поверхности.

13. Найдите момент инерции Земли относительно оси вращения, приняв ее за шар радиусом 6400 км с массой $6 \cdot 10^{24}$ кг.

14. Чему равен момент инерции тонкого прямого стержня длиной 0,6 м и массой 0,3 г относительно оси, перпендикулярной его длине и проходящей через точку стержня, которая удалена на 0,2 м от одного из его концов?

15. Зависимость скорости вращения однородного диска от времени задается уравнением $\omega = A + Bt$, где $B = 4,5$ рад/с². Радиус диска $R = 0,3$ м, а масса $m = 4$ кг. Диск вращается вокруг оси, проходящей через его центр. Найдите величину касательной силы, приложенной к ободу диска. Трением пренебречь.

16. На барабан радиусом $R=0,5$ м намотан шнур, к концу которого привязан груз массой $m_1=10$ кг. Найдите момент инерции барабана, если известно, что груз опускается с ускорением $a=2,04$ м/с².

17. Найдите кинетическую энергию диска массой 2 кг, который катится без скольжения по горизонтальной плоскости со скоростью 4,5 м/с.

18. Найдите кинетическую энергию шара диаметром 6 см и массой 0,3 кг, который катится без скольжения по горизонтальной плоскости, делая 4 об/с.

19. Человек массой 75 кг, стоящий на краю горизонтальной платформы массой 100 кг, вращающейся по инерции вокруг неподвижной вертикальной оси с частотой $n_1=12$ 1/мин, переходит к его центру. Считая платформу круглым однородным диском, а человека – точечной массой, определите, с какой частотой n_1 будет вращаться платформа.

20. На неподвижной платформе массой 150 кг находится человек массой 80 кг. Какое число оборотов в минуту будет совершать платформа, если человек будет двигаться по окружности радиусом 6 м вокруг оси вращения? Скорость движения человека относительно платформы 5 км/ч. Радиус платформы 10 м. Считать платформу однородным диском, а человека – точечной массой.

1.4. Тепловые процессы

Уравнение состояния идеальных газов Менделеева – Клапейрона имеет вид

$$PV = \frac{m}{\mu} RT,$$

где V – объем газа; μ – молярная масса; P – давление газа; m – масса газа; $R = 8,31$ Дж/(к · моль).

Основное уравнение кинетической теории газов – $P = \frac{2}{3}nW_0 = \frac{2}{3}n\frac{m_0\overline{v^2}}{2}$,

где W_0 – средняя кинетическая энергия поступательного движения одной молекулы; m_0 – масса молекулы; n – число молекул в единице объема; $\sqrt{\overline{v^2}}$ – средняя квадратичная скорость молекул.

Число молекул в единице объема $n = \frac{P}{kT}$; $k = \frac{R}{N_A}$ – постоянная

Больцмана; $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹ – число Авогадро; $k = 1,32 \cdot 10^{-23}$ Дж/к.

Средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул

$$\overline{W}_0 = \frac{3}{2}kT.$$

Средняя квадратичная скорость молекул $\sqrt{\overline{v^2}} = \sqrt{\frac{3kT}{\mu}} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}}$,

где $m_0 = \frac{\mu}{N_A}$.

Внутренняя энергия идеального газа, т.е. энергия теплового движения молекул

$$\overline{W} = \frac{m}{\mu} \frac{i}{2} kT,$$

где i – число степеней свободы молекул (для одноатомного газа $i = 3$, двухатомного – $i = 5$, многоатомного – $i = 6$).

Из соотношения $C = \mu c$ следует связь между молярной теплоемкостью C

и удельной c . Молярная теплоемкость газа при постоянном объеме $C_V = \frac{i}{2}k$,

при постоянном давлении $C_P = C_V + R$.

Первое начало термодинамики имеет вид

$$dQ = dW + dA,$$

где dQ – количество теплоты, которое сообщается термодинамической системе; $dA = pdV$ – работа, совершаемая системой при изменении ее объема; dW – изменение внутренней энергии системы.

Изменение внутренней энергии системы в виде идеального газа

$$dW = \frac{m_i}{m^2} kdT,$$

где dT – изменение температуры.

При сгорании топлива массой m выделяется количество теплоты $Q = qm$, где q – удельная теплота сгорания топлива.

Коэффициент полезного действия нагревателя $\eta = \frac{Q_0}{Q}$, где Q_0 – количество полезной теплоты, поглощенное телом, которому оно сообщается от нагревателя; Q – полезное количество теплоты сгорания топлива.

Коэффициент полезного действия тепловой машины, совершающей идеальный цикл Карно,

$$\eta_0 = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1},$$

где Q_1 – количество теплоты, переданное рабочему телу и Q_2 – количество теплоты, отданное холодильнику

Для идеального цикла Карно, $\eta_0 = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$, где T_1 – температура нагревателя; T_2 – температура холодильника.

Задачи по разделу «Тепловые процессы»

1. Найдите давление водорода в сосуде объемом 21 л, где находится 4 г водорода при температуре 30 °С.

2. Определите число молекул, содержащихся в единице массы углекислого газа; найдите массу одной молекулы и для нормальных условий число молекул в 1 см³ газа, если плотность данного газа при нормальных условиях $\rho_0 = 1,98 \text{ кг/м}^3$.

3. Определите массу кислорода, занимающего 200 м³ при температуре 320 К и давлении $1,5 \cdot 10^5$ Па. Найдите плотность кислорода при этих условиях.

4. Сколько степеней свободы имеет молекула, обладающая средней кинетической энергией теплового движения $9,8 \cdot 10^{-21}$ Дж при температуре 6 °С?

5. Чему равна полная средняя кинетическая энергия молекул и средняя кинетическая энергия поступательного движения при температуре 10³ °С для одноатомных, двухатомных и многоатомных газов?

6. Найдите среднюю квадратичную скорость молекул газа, имеющего плотность 1,9 кг/м³ при давлении 150 кПа.

7. Газ нагревается в открытом сосуде при нормальном атмосферном давлении от 30 °С до 330 °С. Насколько при этом изменится число молекул в единице объема?

8. Определите, каким числом степеней свободы обладают молекулы газа, если его удельная теплоемкость при постоянном давлении $980 \text{ Дж/кг} \cdot \text{K}$, а молярная масса 35 кг/кмоль .

9. Определите молярную массу некоторого газа, если разность между удельными теплоемкостями при постоянном давлении и постоянном объеме равна $260 \text{ Дж/кг} \cdot \text{K}$.

10. При нагревании газа на $24 \text{ }^\circ\text{C}$ при постоянном давлении необходимо затратить 500 Дж тепла, а при охлаждении того же количества газа на $80 \text{ }^\circ\text{C}$ при постоянном объеме выделяется 1000 Дж . Определите отношение теплоемкостей C_p / C_v .

11. При температуре $17 \text{ }^\circ\text{C}$ $5,6 \text{ г}$ окиси углерода (CO) находится под давлением $2 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$. После нагревания при постоянном давлении газ занял объем 5 дм^3 . Определите количество теплоты, полученной газом.

12. Закрытый баллон объемом $0,9 \text{ м}^3$ заполнен азотом под давлением $2,3 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$ при температуре $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Газу сообщили $4,6 \cdot 10^3 \text{ кДж}$ тепла. Определите температуру и давление газа в конце процесса.

13. В цилиндре диаметром $d=45 \text{ см}$ содержится $V=0,1 \text{ м}^3$ двухатомного газа. Насколько следует увеличить нагрузку поршня при подводе 80 Дж тепла, чтобы поршень не пришел в движение?

14. При изобарическом расширении некоторой массы многоатомного газа, находящегося под давлением $2 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$, его внутренняя энергия изменилась на 5 кДж . Найдите увеличение объема газа.

15. Вес автомашины $P=35 \text{ кН}$, общее сопротивление движению составляет $0,050$ этой силы, КПД двигателя $\eta = 18\%$, удельная теплота сгорания бензина $q=4,6 \cdot 10^7 \text{ Дж/кг}$, плотность бензина $\rho = 0,7 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$. На сколько километров пути хватит данной автомашине 40 л бензина, (движение считать равномерным)?

16. Какое количество теплоты за сутки теряется через стены и окна в комнате с печным отоплением, если для поддержания в ней постоянной температуры воздуха потребовалось сжечь 11 кг угля? КПД печи равен 35% ; удельная теплота сгорания угля $q=2 \cdot 10^7 \text{ Дж/кг}$.

17. Двигатель автомобиля потребляет $0,3 \text{ кг}$ бензина на $1 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$ энергии. Определите КПД двигателя.

18. Газ совершает цикл Карно. Абсолютная температура нагревателя в 3 раза выше абсолютной температуры холодильника. Какую долю тепла, получаемого за один цикл от нагревателя, газ отдает холодильнику?

19. Газ, совершающий идеальный цикл Карно, три четверти тепла, которое он получил от нагревателя, отдает холодильнику. Температура холодильника 0°C . Определите температуру нагревателя

20. Идеальная тепловая машина, работающая по циклу Карно, имеет температуру нагревателя 230°C , температуру холодильника 130°C . Во сколько раз нужно увеличить температуру нагревателя, чтобы КПД машины увеличился в 3 раза?

1.5. Электромагнитные явления

По закону Кулона сила взаимодействия между двумя точечными зарядами описывается выражением

$$F = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 \epsilon r^2},$$

где q_1 и q_2 – величины зарядов; $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{Ф/м}$ – электрическая постоянная; r – расстояние между зарядами; ϵ – диэлектрическая проницаемость среды.

Напряженность электрического поля $E = \frac{F}{q}$, где F – сила, действующая на заряд q . Напряженность поля нескольких зарядов равна векторной сумме

напряженностей отдельных зарядов: $E = \sum_{i=1}^n E_i$.

Напряженность поля точечного заряда (равномерно заряженного шара или сферы) на расстоянии r от точечного заряда (центра шара или сферы) определяется как

$$E = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 \epsilon r^2},$$

где q – величина точечного заряда.

Работа, совершаемая при перемещении заряда q в однородном электрическом поле $A = qE_S \cos \alpha$, где S – величина перемещения; α – угол между направлением векторов напряженности электрического поля и перемещением. Потенциал в какой-либо точке электрического поля $\varphi = \frac{W}{q}$, где

W – потенциальная энергия заряда q , помещенного в данную точку.

Работа, совершаемая при перемещении заряда q из точки поля с потенциалом φ_1 в точку с потенциалом φ_2 , $A = q(\varphi_1 - \varphi_2)$.

$$\text{Потенциал поля точечного заряда } \varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon_0\epsilon r}.$$

Напряженность электрического поля и потенциал связаны соотношением

$$E = -\frac{d\varphi}{dr}.$$

В случае однородного поля – поля плоского конденсатора $E = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{d}$, где $(\varphi_1 - \varphi_2)$ – разность потенциалов между пластинами конденсатора; d – расстояние между ними.

Потенциал уединенного проводника и его заряд связаны соотношением $q = C\varphi$, где C – емкость проводника.

Емкость плоского конденсатора $C = \frac{\epsilon_0\epsilon S}{d}$, где S – площадь каждой пластины конденсатора.

Емкость уединенного шара $C = 4\pi\epsilon_0\epsilon r$.

Емкость системы конденсаторов:

– при параллельном соединении $C = C_1 + C_2 + C_3 + \dots$

– при последовательном соединении $\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots$

Энергия заряженного проводника $W = \frac{1}{2}q\varphi = \frac{1}{2}c\varphi^2 = \frac{q^2}{2C}$.

Объемная плотность энергии электрического поля: $W_0 = \frac{\epsilon_0\epsilon E^2}{2}$.

Сила тока I численно равна количеству электричества, проходящему через поперечное сечение проводника в единицу времени: $I = \frac{dq}{dt}$, если $I = \text{const}$

, то $I = \frac{q}{t}$.

Плотность электрического поля $j = \frac{I}{S}$, где S – площадь поперечного сечения проводника.

Закон Ома для участка цепи $I = \frac{U}{R}$, где U – разность потенциалов на концах участка и $R = \rho \frac{l}{S}$, где ρ – удельное сопротивление, l и S – длина и площадь поперечного сечения проводника.

$$\text{Работа электрического тока цепи } A = IUt = I^2 R t = \frac{U^2 t}{R}.$$

Для замкнутой цепи закон Ома имеет вид $I = \frac{\varepsilon}{R + r}$, где ε – ЭДС источника тока; R – внешнее сопротивление; r – внутренне сопротивление источника тока. Полная мощность, выделенная в цепи, $P = \varepsilon I$.

Первый закон Кирхгофа – алгебраическая сумма сил токов, сходящихся в узле, равна нулю, $\sum_{i=1}^n I_i = 0$.

Второй закон Кирхгофа – в любом замкнутом контуре алгебраическая сумма падений потенциала на отдельных участках цепи равна алгебраической сумме ЭДС источников, включенных в данном контуре, $\sum I R = \sum \varepsilon$.

В соответствии с законом Био–Савара–Лапласа элемент контура dl , по которому течет ток I , создает в некоторой точке A пространства магнитное поле напряженностью $dH = \frac{I \sin \alpha dl}{4\pi r^2}$, где r – расстояние от элемента dl до точки A , α – угол между радиус-вектором r и элементом dl .

Напряженность магнитного поля в центре кругового тока $H = \frac{I}{2R}$, где R – радиус кругового контура с током.

Напряженность магнитного поля бесконечно длинного проводника с током на расстояний a определяется формулой $H = \frac{I}{2\pi a}$.

Напряженность магнитного поля внутри бесконечно длинного соленоида и тороида $H = In$, где n – число витков на единицу длины.

Магнитная индукция B связана с напряженностью H магнитного поля соотношением $B = \mu_0 \mu H$, где $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная; μ – магнитная проницаемость среды.

$$\text{Объемная плотность энергии магнитного поля } W_0 = \frac{HB}{2}.$$

Поток магнитной индукции сквозь контур $\Phi = BS \cos \varphi$, где S – площадь контура; φ – угол между нормалью к плоскости контура и направлением магнитного поля.

На элемент dl проводника с током, находящимся в магнитном поле, действует сила Ампера:

$$dF = BI \sin \alpha dl,$$

где α – угол между направлениями тока и магнитного поля.

Сила, действующая на заряженную частицу, движущуюся со скоростью v в магнитном поле, определяется формулой Лоренца

$$F = qBv \sin \alpha,$$

где q – заряд частицы и α – угол между направлениями скорости частицы и магнитного поля.

ЭДС электромагнитной индукции в соответствии с законом Фарадея: $\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt}$.

Изменение потока магнитной индукции достигается, например, при изменении силы тока в самом контуре (явление самоиндукции).

При этом ЭДС самоиндукции $\varepsilon = -L \frac{dI}{dt}$, где L – индуктивность контура.

Индуктивность соленоида $L = \mu_0 \mu n^2 l S$, где l – длина соленоида; S – площадь его поперечного сечения; n – число витков на единицу длины.

Энергия магнитного поля контура с током $W = \frac{1}{2} LI^2$.

Задачи по разделу «Электромагнитные явления»

1. Два заряда $16 \cdot 10^{-9}$ и $-6 \cdot 10^{-9}$ Кл находятся на расстоянии 5,5 см друг от друга. Найдите на прямой, проходящей через данные заряды, точку, с нулевой напряженностью поля.

2. Во сколько раз сила гравитационного притяжения между двумя протонами меньше их силы электростатического отталкивания? Заряд протона $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, масса протона $1,7 \cdot 10^{-27}$ кг.

3. С какой силой притягивается электрон к ядру атома водорода, если диаметр атома водорода 10^{-8} см, а заряд электрона равен $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл?

4. Два одноименных заряда $5 \cdot 10^{-9}$ и 10^{-8} Кл находятся на расстоянии 5 см друг от друга. На каком расстоянии между ними следует поместить третий заряд, чтобы вся система находилась в равновесии?

5. В центре квадрата расположен положительный заряд $2,5 \cdot 10^{-7}$ Кл. Какой отрицательный заряд следует поместить в каждой вершине квадрата, чтобы система зарядов находилась в равновесии?

6. С какой силой действует электрическое поле в атмосфере на молекулу кислорода, содержащего один избыточный электрон, если напряженность поля в приземном слое атмосферы 125 В/м (заряд электрона $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл)?

7. Разность потенциалов электрического поля Земли между двумя точками, отстоящими по вертикали на $0,48$ м, равна 62 В. Определите напряженность поля Земли в приземном слое, считая его однородным. Каков потенциал поля относительно Земли на высоте 11 м?

8. Эквипотенциальная линия проходит через точку с напряженностью $E_1 = 6$ кВ/м, отстоящую от создающего поле заряда на расстоянии $R_1 = 2,6$ см. На каком расстоянии от заряда проходит другая эквипотенциальная линия, если разность потенциалов между линиями $\Delta\varphi = 30$ В.

9. К заряженному до напряжения $U_1 = 200$ В конденсатору емкостью $C_1 = 20$ мкФ присоединяют параллельно незаряженный конденсатор емкостью $C_2 = 300$ мкФ. Какое напряжение установится после их соединения?

10. Конденсаторы емкостью 260 и 500 мкФ соединили параллельно и подключили к источнику постоянного напряжения 11 В. Найдите заряд каждого конденсатора, их общий заряд и общую емкость.

11. Найдите напряженность поля плоского конденсатора с расстоянием между пластинами $6 \cdot 10^{-2}$ м, если электрон, двигаясь вдоль силовой линии от одной пластины к другой, приобретает скорость $4 \cdot 10^6$ м/с.

12. Определите емкость плоского конденсатора, присоединенного к источнику тока с напряжением 300 В. Энергия конденсатора равна $2,3 \cdot 10^{-2}$ Дж.

13. Два последовательно соединенных конденсатора емкостями $C_1 = 2$ мкФ и $C_2 = 3$ мкФ зарядили до разности потенциалов $U = 950$ В. Найдите изменение энергии системы, если ее отключить от источника напряжения и одноименно заряженные обкладки конденсатора соединить параллельно.

14. Генератор постоянного тока дает во внешнюю цепь ток 10 А. Сопротивление внешней цепи 12 Ом. Определите ЭДС, индуцируемую в обмотке якоря, и напряженность на зажимах генератора, если сопротивление якоря $0,3$ Ом.

15. Батарея из двух параллельно соединенных источников с ЭДС 1,8 и 2 В и внутренним сопротивлением по 0,05 Ом каждый замкнута на сопротивление 2 Ом. Найдите силу тока, проходящего через сопротивление и через источники.

16. Два параллельно соединенных сопротивления, из которых одно сопротивление в 2 раза больше другого, включены в сеть напряжением 90 В. Найдите величину этих сопротивлений и ток в них, если до разветвления ток равен 1,5 А.

1.6. Колебательные и волновые процессы

Колебаниями называются движения или процессы, характеризующиеся определенной повторяемостью во времени. Колебательные процессы широко распространены в природе и технике, например, качание маятника часов, колебание струн музыкальных инструментов, приливы и отливы, переменный электрический ток и т. д. При колебательном движении маятника изменяется координата его центра масс, в случае переменного тока колеблются напряжения и ток в цепи. Физическая природа колебаний может быть разной, в зависимости от этого различают колебания механические, электромагнитные и др. Однако многие различные колебательные процессы можно описать одинаковыми уравнениями. Отсюда следует целесообразность единого подхода к изучению колебаний различной физической природы.

Колебания называются *свободными* или *собственными*, если они совершаются за счет первоначально сообщенной энергии при последующем отсутствии внешних воздействий на колебательную систему.

Простейшим видом повторяющихся процессов являются *гармонические колебания* – колебания, при которых колеблющаяся величина изменяется со временем по закону синуса (косинуса). Встречающиеся в природе и технике колебания часто по своему характеру близки к гармоническим. Различные периодические процессы (процессы, повторяющиеся через равные промежутки) можно представить в виде сложения гармонических колебаний.

Колебания математического маятника близки к гармоническим. *Математический маятник* – это идеализированная система, состоящая из материальной точки массой m , которая подвешена на нерастяжимой невесомой нити. Он совершает колебания под действием силы тяжести. Хорошим приближением математического маятника является небольшой тяжелый шарик, подвешенный на тонкой длинной нити. Гармоническое изменение величины s описывается уравнением

$$S = A \cos(\omega t + \varphi_0),$$

где A – максимальное значение колеблющейся волны, т.е. амплитуда колебаний; ω – круговая (циклическая) частота; φ_0 – начальная фаза колебания в момент времени $t = 0$; $(\omega t + \varphi_0)$ – фаза колебания в момент времени t (рис.1.1).

Определенные состояния системы, совершающей гармонические колебания, повторяются через промежуток времени T , называемый периодом колебаний, за который фаза колебания изменяется на 2π , т.е.

$$\omega(t + T) + \varphi_0 = (\omega t + \varphi_0) + 2\pi, \quad (1.1)$$

откуда
$$T = \frac{2\pi}{\omega}. \quad (1.2)$$

Величина, обратная периоду колебаний,

$$\nu = \frac{1}{T}, \quad (1.3)$$

т.е. число полных колебаний, совершаемых в единицу времени, называется частотой колебаний.

Сравнивая (1.2) и (1.3), получим

$$\omega = 2\pi\nu.$$

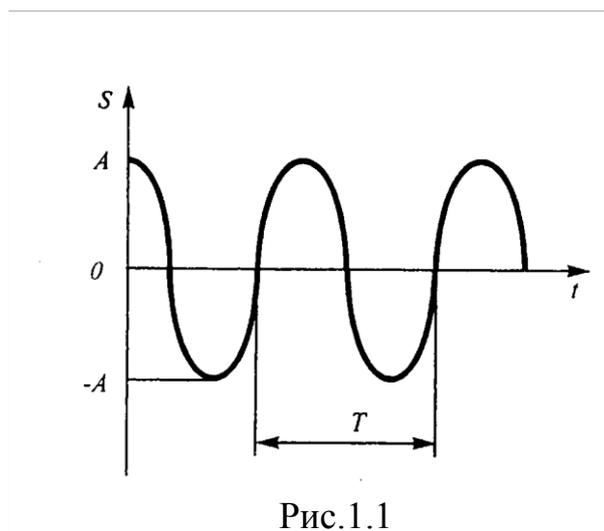


Рис.1.1

В качестве наглядного примера рассмотрим механические колебания материальной точки. Пусть материальная точка совершает прямолинейные гармонические колебания вдоль оси координат x около положения равновесия, принятого за начало координат. Тогда зависимость координаты x от времени t можно описать уравнением (1.1), где $S = x$,

$$x = A \cos(\omega t + \varphi_0). \quad (1.4)$$

Запишем первую и вторую производные по времени от координаты x , определяющие соответственно скорость и ускорение:

$$v = \frac{dx}{dt} = -A\omega \sin(\omega t + \varphi_0) = A\omega \cos(\omega t + \varphi_0 + \frac{\pi}{2}), \quad (1.5)$$

$$a = \frac{d^2x}{dt^2} = -A\omega^2 \cos(\omega t + \varphi_0) = A\omega^2 \cos(\omega t + \varphi_0 + \pi). \quad (1.6)$$

Из этих уравнений видно, что и скорость v , и ускорение a материальной точки изменяются по гармоническому закону с одной и той же циклической частотой. Амплитуда скорости и ускорения соответственно равны $A\omega$ и $A\omega^2$

.Фаза скорости (1.5) отличается от фазы координаты на $\frac{\pi}{2}$, а фаза ускорения на π .

Сила $F = ma$, действующая на колеблющуюся материальную точку массой m , с учетом (1.4) и (1.6) определяется как $F = -m\omega^2 x$.

Следовательно, сила, действующая на материальную точку, пропорциональна смещению точки из положения равновесия, направлена в противоположную сторону и поэтому называется возвращающей силой.

Кинетическая энергия материальной точки, совершающей прямолинейные гармонические колебания,

$$W = \frac{m v^2}{2} = \frac{mA^2\omega^2}{2} \sin^2(\omega t + \varphi_0). \quad (1.7)$$

Потенциальная энергия материальной точки, движущейся по гармоническому закону под действием упругой силы F ,

$$\Pi = -\int_0^x F dx = \frac{m\omega^2 x^2}{2} = \frac{mA^2\omega^2}{2} \cos^2(\omega t + \varphi_0). \quad (1.8)$$

Сложив (1.7) и (1.8), получим формулу для полной энергии:

$$E = \frac{mA^2\omega^2}{2}.$$

Полная энергия остается постоянной, т.к. для гармонических колебаний справедлив закон сохранения механической энергии.

Колебания при небольшом отклонении материальной точки от положения равновесия называются малыми колебаниями. Можно показать, что период малых колебаний математического маятника

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}, \quad (1.9)$$

где l – длина маятника; g – ускорение свободного падения.

Амплитуда свободных колебаний из-за потерь энергии системы с течением времени уменьшается, т.е. происходит затухание колебаний, которые обуславливаются трением и сопротивлением среды.

При затухании колебаний на тело, кроме возвращающей силы $F = -m\omega^2 x$, действует сила трения F_0 , величина которой при небольших скоростях пропорциональна скорости v , т.е. $F = -r v$, где r – коэффициент сопротивления.

Уравнение движения при наличии силы сопротивления примет вид

$$ma = -m\omega^2 x - r\dot{x}.$$

На основании данного уравнения можно записать дифференциальное уравнение свободных затухающих колебаний, например, для реального математического маятника, в виде

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + 2\delta \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = 0, \quad (1.10)$$

где δ – коэффициент затухания ($\delta = \frac{r}{2m}$).

В случае малых затуханий в результате решения уравнения (1.10) получим $x = A_0 e^{-\delta t} \cos(\omega t + \varphi_0)$, где $x = A_0 e^{-\delta t}$ – амплитуда затухающих колебаний; A_0 – начальная амплитуда.

Частота затухающих колебаний

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}. \quad (1.11)$$

Промежуток времени $\tau = \frac{1}{\delta}$, в течение которого амплитуда затухающих

колебаний уменьшается в e раз, называется временем релаксации.

Затухание нарушает периодичность колебаний, поэтому затухающие колебания не являются периодическими и, строго говоря, к ним не применимо понятие периода частоты. Однако если затухание мало, то можно условно пользоваться понятием периода T как промежуток времени между двумя последующими максимальными или минимальными колеблющейся физической волны. (рис. 1.2)

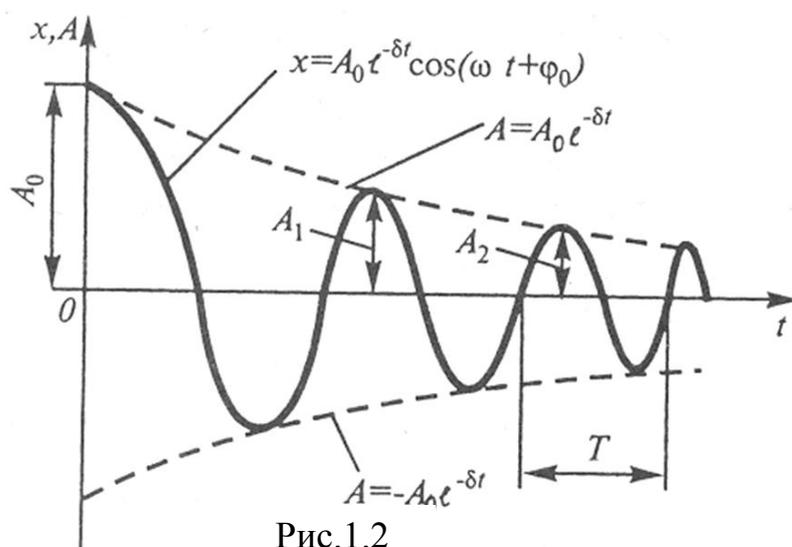


Рис.1.2

Тогда с учетом формулы (1.2) период затухающих колебаний

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}}.$$

Если $A(t)$ и $A(t+T)$ – амплитуды двух последовательных колебаний, соответствующих моментам времени, отличающимся на период, то отношение

$$\frac{A(t)}{A(t+T)} = e^{\delta T}$$

называется декрементом затухания, а его логарифм

$$\Theta = \ln \frac{A(t)}{A(t+T)} = \delta T = \frac{T}{\tau} = \frac{1}{N_e}$$

называется логарифмическим декрементом затухания, N_e – число колебаний, совершаемых за время уменьшения амплитуды в e раз. Логарифмический декремент затухания – постоянная для данной колебательной системы величина.

Период T электромагнитных колебаний в контуре, состоящем из емкости C , индуктивности L , активным сопротивлением которого можно пренебречь, определяется формулой $T = 2\pi\sqrt{LC}$.

Если активное сопротивление контура R не равно нулю, то электромагнитные колебания будут затухающими. При этом разность потенциалов на обкладках конденсатора меняется со временем по закону $U = U_0 e^{-\delta t} \cos \omega t$, если в начальный момент эта разность потенциалов

максимальна. Здесь $\delta = \frac{R}{2L}$ – коэффициент затухания. При $\delta = 0$ колебания затухающие и $U = U_0 \cos \omega t$.

Закон Ома для переменного тока

$$I_{\text{эф}} = U_{\text{эф}} / Z,$$

где $I_{\text{эф}}$ и $U_{\text{эф}}$ – эффективные значения силы и напряжения, связанными с их амплитудными значениями I_0 и U_0 соотношениями $I_{\text{эф}} = \frac{I_0}{\sqrt{2}}$ и $U_{\text{эф}} = \frac{U_0}{\sqrt{2}}$, где

Z – полное сопротивление цепи. Если цепь содержит активное сопротивление R , емкость C и индуктивность L , соединенные последовательно, то

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}.$$

Мощность переменного тока $P = I_{\text{эф}} U_{\text{эф}} \cos \varphi$, где φ – сдвиг фаз между током и напряжением.

При распространении незатухающих колебаний со скоростью U вдоль некоторого напряжения, называемого лучом, смещения у любой точки, лежащей на луче и отстоящей от источника колебаний на расстоянии x , определяется уравнением бегущей волны:

$$y = A \sin \omega \left(t - \frac{x}{v} \right) = A \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right),$$

где λ – длина волны; A – амплитуда волны; T – период; ω – циклическая частота.

Скорость распространения волны $v = \lambda \nu$, $\nu = \frac{\lambda}{T}$.

Две точки, лежащие на луче на расстояниях x_1 и x_2 от источника колебаний, имеют разность фаз:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = 2\pi \frac{x_2 - x_1}{\lambda}.$$

При интерференции волн максимум амплитуды соответствует условию

$$x_1 - x_2 = 2n \frac{\lambda}{z} \quad (n = 0, 1, 2, 3, \dots),$$

где $(x_2 - x_1)$ – разность хода лучей. Минимум амплитуды определяется условием

$$x_1 - x_2 = (2n + 1) \frac{\lambda}{z} \quad (n = 0, 1, 2, 3, \dots).$$

При интерференции двух когерентных волн расстояние между возникающими на экране двумя смежными интерференционными полосами определяется формулой $\Delta x = \frac{l}{d} \lambda$, где l – расстояние от краев до источника света, λ – длина волны интерферирующих волн, d – расстояние между источниками света (при этом $\lambda \ll d$, $d \ll l$).

Условие усиления света при интерференции в плоскопараллельных пластинах в проходящем свете определяется по формуле

$$2hn \cos r = 2k \frac{\lambda}{z} \quad (k=0, 1, 2, 3, \dots),$$

где h – толщина пластины; n – показатель преломления; r – угол преломления; λ – длина волны света.

Условие ослабления света: $2hn \cos r = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}$, ($k=0,1,2,3\dots$).

В дифракционной решетке максимумы света наблюдаются в направлениях, составляющих с нормалью к решетке угол φ , удовлетворяющий условию (при нормальном падении света на решетку): $d \sin \varphi = \pm k\lambda$ ($k = 0,1,2,\dots$), где d – постоянная решетки; φ – угол дифракции; k – порядок спектра.

Постоянная (или период) решетки $d = \frac{1}{N_0}$, где N_0 – число щелей, приходящихся на единицу длины решетки.

При отражении света от диэлектрика полная поляризация наступает при условии $\operatorname{tg} i = n$ (закон Брюстера), где i – угол падения луча, n – показатель преломления диэлектрика.

Интенсивность света, прошедшего через поляризатор и анализатор, определяется по формуле $I = I_0 \cos^2 \varphi$ (закон Малюса), где φ – угол между главными плоскостями поляризатора и анализатора; I_0 – интенсивность света, прошедшего через поляризатор.

Задачи по разделу «Колебательные и волновые процессы»

1. Два маятника, длины которых различаются на 20 см, совершают колебания в одном и том же месте за некоторое время: один – 30, а другой – 35 колебаний. Определите длины обоих маятников.

2. Определите период гармонических колебаний материальной точки, если амплитуда колебаний – 1 см, а максимальная скорость – 33 см/с.

3. Через какое время от начала движения точка, совершающая гармонические колебания с периодом 12 с и начальной фазой, равной 0, сместится от положения равновесия на расстояние, равное половине амплитуды?

4. Тело массой 5 г совершает колебание, которое в системе СИ описывается уравнением $x = 0,1 \sin \frac{\pi}{2} (t + \frac{1}{3})$. Найдите численные значения кинетической и потенциальной энергии через 20 с от начала колебаний. Чему равна полная энергия тела?

5. Амплитуда колебаний камертона за 15 с уменьшилась в 100 раз. Найдите коэффициент затухания и время релаксации колебаний.

6. Как изменится ход маятниковых часов на высоте 20 км над поверхностью Земли?

7. Часы с математическим маятником отрегулированы в Москве. Как изменится ход часов за сутки на экваторе? Ускорение силы тяжести в Москве $g_1 = 981,6 \text{ см/с}^2$, на экваторе $g_2 = 981,0 \text{ см/с}^2$.

8. Во сколько раз и как отличается период гармонических колебаний математического маятника на планете, масса и радиус которой в четыре раза больше, чем у Земли, от периода колебаний такого же маятника на Земле?

9. Космический корабль движется вдали от небесных тел. Как по периоду колебаний T математического маятника длиной l , подвешенного в кабине корабля, определить ускорение корабля, сообщаемое ему работающими двигателями?

10. На какую волну настроен радиоприемник, если его приемный контур обладает самоиндукцией 1,5 мГн и емкостью 450 пФ?

11. Активное сопротивление R и индуктивность L соединены параллельно и включены в цепь переменного тока напряжением 127 В и частотой 50 Гц. Найдите активное сопротивление R и индуктивность L , если известно, что мощность, поглощаемая в этой цепи, равна 404 Вт и сдвиг фаз между напряжением и током равен 60° .

12. В цепь переменного тока напряжением 220 В и частотой 50 Гц включены последовательно емкость 35 мкФ, активное сопротивление 100 Ом и индуктивность 0,7 Гн. Найдите силу тока в цепи и падение напряжения на емкости, омическом сопротивлении и индуктивности.

13. Определите длину волны при частоте 200 Гц, если скорость распространения волн равна 340 м/с.

14. Определите скорость распространения волны, если источник, колеблющийся с периодом 2 мс, возбуждает в воде волны длиной 3 м.

15. Точки, находящиеся на одном луче и удаленные от источника колебаний на расстояние $l_1 = 12 \text{ м}$ и $l_2 = 14 \text{ м}$, колеблются с разностью фаз $3\pi/2$. Определите скорость распространения колебаний в данной среде, если период колебаний источника $T=1 \text{ мс}$.

16. Определите расстояние между ближайшими точками бегущей волны, лежащими на одном луче, которые колеблются в одинаковых фазах, если скорость распространения волн равна $5 \cdot 10 \text{ м/с}$, а частота составляет 100 Гц.

17. Уравнение колебаний вибратора $x = 3 \sin 20\pi t$, где x выражено в см. Считая волну плоской, определите смещение точки, расположенной на расстоянии 5,9 м от источника колебаний, через 0,1 с после начала колебаний при скорости распространения волны 200 м/с.

18. Определите длину стоячей волны, если расстояние между первым и третьим узлами равно 0,2 м.

19. Расстояние между соседними узлами стоячей волны, создаваемой камертоном в воздухе, равно 40 см. Определите частоту колебаний камертона. Скорость звука равна 340 м/с.

20. Два источника посылают когерентные волны в одинаковых фазах. При какой разности хода Δl волн будет наблюдаться усиление колебаний? Периоды колебаний равны 0,1 с, скорость распространения волн в среде 10^3 м/с.

1.7. Релятивистское движение

Движение тел со скоростью, близкой к скорости света, принято называть релятивистским.

Длина тела в направлении движения со скоростью v относительно системы отсчета связана с длиной l_0 покоящегося тела соотношением

$$l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}, \text{ где } c - \text{ скорость света в вакууме.}$$

Промежуток времени Δt в системе, движущейся со скоростью v по отношению к наблюдателю, связан с промежутком времени Δt_0 в неподвижной

для наблюдателя системе соотношением
$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Зависимость массы тела от скорости его движения определяется по

формуле
$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \text{ где } m_0 - \text{ масса покоящегося тела.}$$

Кинетическая энергия движущегося тела $W_k = mc^2 - m_0c^2$, где m – масса тела, движущегося со скоростью v .

Изменение массы системы на Δm соответствует изменению ее энергии на

$$\Delta W = \Delta mc^2.$$

Задачи по разделу «Релятивистское движение»

1. Чему равно релятивистское сокращение метрового стержня, который мог бы двигаться мимо нас со скоростью $1,8 \cdot 10^8$ м/с?
2. Реактивный самолет летит со скоростью 3600 км/ч. Насколько будут отличаться показания часов в самолете от показания часов на Земле?
3. Во сколько раз движущийся электрон со скоростью $v = 0,999$ с тяжелее покоящегося?
4. Синхрофазатрон сообщает протонам энергию $1,6 \cdot 10^{-9}$ Дж. Во сколько раз такие протоны тяжелее обычных?
5. Какому изменению массы соответствует изменению энергии на 1 Дж?
6. Ускоритель разгоняет протоны до кинетической энергии $70 \cdot 10^9$ эВ. С какой скоростью движутся протоны? Во сколько раз увеличится их масса?
7. Какую ускоряющую электрическую разность потенциалов должен пройти первоначально покоящийся электрон, чтобы его кинетическая энергия стала в 10 раз больше его энергии покоя?
8. При какой скорости кинетическая энергия частицы равна энергии покоя?
9. Тело движется со скоростью $2 \cdot 10^8$ м/с. Во сколько раз увеличится при этом плотность тела?

1.8. Корпускулярно-волновые свойства

Энергия кванта света (фотона) $E = h\nu$, где $h = 6,625 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка; ν – частота излучения.

Импульс фотона $P = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$, где $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света в вакууме.

Связь между энергией фотона, вызывающего внешний фотоэффект, и максимальной кинетической энергией вылетевших электронов определяется по

формуле
$$h\nu = A + \frac{m\nu^2}{2},$$

здесь A – работа выхода электронов поверхности металла. Если $\nu = 0$, то $h\nu_0 = A$, где ν_0 – частота, соответствующая красной границе фотоэффекта.

С любой частицей, обладающей импульсом P , сопоставляется волновой процесс с длиной волны де Бройля $\lambda = \frac{h}{p}$.

Задачи по разделу «Корпускулярно-волновые свойства»

1. С какой скоростью должен двигаться электрон, чтобы его кинетическая энергия была равна энергии фотона с длиной волны $\lambda = 520$ нм?
2. Определите энергию и импульс фотона, если соответствующая ему длина волны равна 1,6 пм?
3. С какой скоростью должен двигаться электрон, чтобы импульс его был равен импульсу фотона с длиной волны $\lambda = 520$ нм?
4. Энергия фотона 1 МэВ. Определите импульс фотона.
5. Определите красную границу фотоэффекта для платины, серебра и вольфрама, если работа выхода из данных металлов равна соответственно 6,3; 4,74; 4,5 эВ.
6. Работа выхода электронов из молибдена равна 4,2 эВ. Какова скорость электронов, вылетающих с поверхности молибдена при освещении его лучами с длиной волны 200 нм?
7. Изолированная металлическая пластинка освещена светом с длиной волны 450 нм. Работа выходов электронов из металла 2 эВ. До какого потенциала зарядится пластинка при непрерывном падении света?
8. Найти длину волны де Бройля электрона, движущегося со скоростью $2 \cdot 10^4$ м/с. Масса электрона $9,11 \cdot 10^{-31}$ кг.
9. Определите длину волны де Бройля для протона с кинетической энергией 100 эВ.
10. Вычислите длину волны де Бройля для электрона, движущегося со скоростью, равной 0,8 скорости света в вакууме. Учтите изменение массы при движении электрона.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

2.1. Общие сведения

Любому материальному объекту присущи вполне определенные свойства, большинство из которых характеризуется численными величинами. Например, для куска медного провода можно определить следующие величины: диаметр, длину, массу, электропроводность, температурный коэффициент расширения, электрическое сопротивление и др. Некоторые свойства объектов и явления природы труднее поддаются количественному описанию. К ним можно отнести, например, цвет, блеск, способность противостоять многократным изгибам. Однако даже в таких случаях необходимо определить соответствующие данным свойствам количественные характеристики, без знания которых невозможно описать достаточно точно исследуемый объект.

Для определения численного значения какого-либо параметра необходимо знать, во сколько раз оно больше или меньше эталонной величины.

Операция сравнения определяемой величины для исследуемого объекта с соответствующей величиной эталона называется измерением.

Например, за единицу длины принят эталонный метр – определенное расстояние между штрихами, нанесенными на стержне из особого стойкого сплава. При измерении массы некоторого тела устанавливается, во сколько раз измеряемая масса превосходит массу эталонного образца в один килограмм. Разумеется, очень редко пользуются сравнением измеряемых величин с величинами эталонов, хранящихся в государственных метрологических учреждениях. В основном используют различного рода измерительные устройства и приборы, тем или иным способом сверенные с эталонами. Это относится в одинаковой мере как к устройствам и приборам для измерения длины (различные линейки, микрометр, измерительный микроскоп и т. п.), так и к измерителям времени, массы, а также электроизмерительным, оптическим и многим другим приборам.

Принято различать два вида экспериментальных измерений – прямые и косвенные. При *прямом измерении* определяемая величина сравнивается с единицей измерения непосредственно при помощи измерительного прибора. Измерение длины рулеткой либо штангенциркулем, измерение промежутков времени секундомером, измерение силы тока амперметром и т. п. – все это примеры прямых измерений, при которых измеряемая величина отсчитывается непосредственно по шкале прибора.

При *косвенном измерении* определяемая величина вычисляется по формуле, включающей результаты прямых измерений. К косвенным измерениям относятся, например, определение площади прямоугольника по измеренным двум его сторонам, определение сопротивления участка цепи по силе тока и напряжению, определение концентрации примесей по интенсивности ее спектральных линий и т. п.

Независимо от способа измерения определение той или иной физической величины сопровождается ошибкой, показывающей, насколько искомая величина отличается от ее истинного значения.

2.2. Ошибки измерений

Никакое измерение нельзя выполнить абсолютно точно. Другими словами, при измерении какой-либо величины любым способом абсолютное значение ее недостижимо, а это означает, что результат измерения содержит некоторую погрешность – ошибку измерений. Такой вывод следует из одного из положений теории естественнонаучного познания окружающего мира – любое научное знание относительно. Ограниченные возможности измерительных приборов, несовершенство органов чувств, неоднородность измерительных объектов, внешние и внутренние факторы, влияющие на объекты и т. п. – вот основные причины недостижимости абсолютного значения измеряемой величины.

Точность измерений возрастает по мере увеличения чувствительности измерительного прибора. Однако при измерении сколь угодно чувствительным прибором нельзя сделать ошибку измерений меньше ошибки измерительного прибора, даже при многократном повторении измерений. Например, если линейка позволяет измерить длину с относительной ошибкой 0,1 %, что соответствует 1 мм на линейке длиной 1 м, то, применяя ее для измерения длины любых объектов, нельзя определить длину с ошибкой, меньшей 0,1 %. Абсолютное значение является идеальным, недостижимым на практике. Чем точнее поставлен эксперимент, чем совершеннее измерительная техника и т. п., тем ближе измеряемая величина к абсолютной. Одна из важных целей экспериментатора – приблизить получаемые экспериментальные данные к их абсолютным величинам.

В зависимости от причин, порождающих ошибки, различают систематические, случайные и приборные ошибки. К ним не относят грубые ошибки, вызванные невниманием при снятии показаний приборов, неправильной записью измеряемых данных, ошибками при вычислениях и т. п.

Такие ошибки не подчиняются какому-либо закону и устраняются при промежуточной оценке результатов измерений.

Систематические ошибки возникают при многократном повторении измерений и обуславливаются неисправностью измерительных приборов, неточностью методов измерений и использованием для расчетов неточных данных. Если, например, стрелка амперметра изогнута или смещен «нуль» прибора, то при измерении таким прибором всегда получится ошибочная величина. Сколько бы раз ни проводились измерения, как бы тщательно ни записывались показания прибора, в измерениях всегда будет одна и та же ошибка. Для устранения систематической ошибки, вызванной неисправностью прибора, необходимо ввести соответствующие поправки, полученные при сравнении показаний неисправного и исправного приборов. Систематическая ошибка всегда увеличивает или уменьшает результат измерений на одну и ту же величину. Следовательно, даже полное совпадение ряда измеренных величин не является признаком отсутствия систематической ошибки – ее нельзя выявить при повторных измерениях.

Сущность систематических ошибок, обусловленных методом измерений, можно пояснить на примере определения электрического сопротивления, при котором возникает систематическая ошибка, вызванная неучтенным электрическим сопротивлением соединительных проводов в цепи измерительной схемы. Чтобы ее устранить, нужно ввести поправки на неучтенное сопротивление.

Для устранения систематических ошибок требуются тщательная проверка всех измерительных приборов и кропотливый анализ методов измерений.

Случайные ошибки возникают случайно при совокупном действии многих факторов и остаются при устранении грубых и систематических ошибок. Можно назвать многочисленные объективные и субъективные причины случайных ошибок: изменение напряжения в сети при электрических измерениях, неоднородность вещества при определении плотности, изменение условий окружающей среды (температуры, давления), и др. Подобные причины приводят к тому, что несколько измерений одной и той же величины дают различные результаты. К случайным ошибкам относятся и те, причины которых неизвестны или неясны.

Вследствие непредсказуемых обстоятельств случайные ошибки могут как увеличивать, так и уменьшать значения измеряемой величины. Обычно случайные ошибки не устраняются – их нельзя избежать в каждом из результатов измерений.

Случайные ошибки подчиняются законам теории вероятностей, установленным для случайных явлений. С помощью методов теории вероятностей можно уменьшить влияние случайных ошибок на результат эксперимента. Широко известен нормальный закон распределения случайных ошибок (закон Гаусса), из которого следуют важные выводы:

- малые по модулю ошибки встречаются чаще;
- равные по модулю случайные ошибки разных знаков встречаются одинаково часто;
- с увеличением точности (уменьшением интервала разброса измеренных значений) плотность случайных ошибок возрастет.

Теория случайных ошибок позволяет определить наиболее вероятные значения измеряемых величин и возможные отклонения от них. Однако следует отметить, что выводы теории вероятностей справедливы только для достаточно большого числа случайных событий. Поэтому, строго говоря, применение теории случайных ошибок целесообразно только к сравнительно большому числу измерений. На практике же часто ограничиваются 5–10 измерениями, хотя следует помнить, что увеличение числа измерений уменьшает влияние случайных ошибок. В каждом конкретном случае для получения заданной точности устанавливается необходимое число измерений.

Приборные ошибки обуславливаются конструктивными особенностями измерительных приборов. Приборную ошибку иногда называют точностью измерительного прибора. По величине ошибок, которые могут вносить при измерении электроизмерительные приборы, различают семь классов точности приборов, которые обозначаются цифрами: 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0. *Цифра класса точности показывает величину относительной ошибки в процентах при отклонении стрелки прибора до последнего деления шкалы.* Абсолютная ошибка прибора при любом отклонении стрелки одинакова. Поэтому при меньших отклонениях стрелки относительная ошибка больше. Например, если у прибора класса точности 0,5 вся шкала содержит 150 делений, то относительная ошибка при отклонении на все 150 делений составляет 0,5%, а абсолютная ошибка равна 0,75 деления. При отклонении стрелки на 25 делений абсолютная ошибка та же – 0,75 деления, а относительная ошибка – 3 %. Для получения возможно меньших относительных ошибок при пользовании измерительными приборами необходимо добиваться достаточно большого отклонения стрелки, не меньше, чем на половину шкалы. Для этого нужно выбирать прибор с достаточно высокой чувствительностью или переходить к меньшим пределам измерений многопредельного прибора.

2.3. Измерительные приборы

Большинство приборов для измерения разных физических величин содержит линейные, угловые или круговые шкалы. Показание того или иного прибора соответствует длине отрезков прямой или дуги. Чем больше точность прибора, тем больше должно быть число делений, на которые разбита шкала. Для одной и той же шкалы с увеличением числа делений расстояние между штрихами уменьшается.

В некоторых приборах для повышения точности измерений применяют различные приспособления, позволяющие отсчитывать доли деления шкалы. Наиболее широко распространены нониусы и микрометрические винты, их обычно применяют в приборах для измерения длины или угла, в которых части прибора перемещаются относительно друг друга. На одной из частей наносится основная шкала, а на другой – нониус, представляющий собой небольшую дополнительную шкалу, передвигающуюся при измерении вдоль основной шкалы. Удобство отсчета с применением нониуса заключается в том, что человеческий глаз легко различает, является ли один штрих продолжением другого или они сдвинуты друг относительно друга.

Иногда для отсчета долей деления применяют специальный циферблат, указатель которого связан с перемещением измерительного устройства механической передачей. В оптических приборах современных конструкций наносят микроскопические цифры около каждого штриха шкалы, и показание отсчетов снимают при помощи отсчетного микроскопа, в поле зрения которого видна только одна необходимая цифра и дополнительная шкала для отсчета долей деления.

Для измерения небольших линейных размеров наиболее часто применяют штангенциркуль и микрометр. Размеры от 3 до 5 мм удобно определять измерительным микроскопом.

Современные технические средства позволяют определить минимальное расстояние, примерно равное 10^{-18} м. Максимальное расстояние, доступное современным измерениям, составляет около 10^{26} м (такому расстоянию соответствует радиус космологического горизонта).

В экспериментальной работе для измерения малых промежутков времени (до 30 мин) часто применяют секундомер. Цена самого мелкого деления секундной шкалы, например секундомера СМ-60, равна 0,2 с. В настоящее время широко применяют электронные измерители времени с цифровой индикацией.

В повседневной жизни легко воспринимаются привычные интервалы времени: минута, час, сутки и т. п. В то же время в современном естествознании оперируют и совершенно другими интервалами времени – миллиардами лет при определении возраста Вселенной и ничтожно малыми долями секунды – 10^{-20} – для характеристики продолжительности ядерных процессов.

Для измерения электрических величин используют электроизмерительные приборы. Принцип их действия основан на превращении электрической энергии в другие виды энергии, например, механическую, тепловую, магнитную и т. д. Каждый электрический прибор состоит из двух основных частей: электрического и отсчетного механизмов. Отсчетный механизм большинства приборов содержит шкалу и указатель, который определяет точку шкалы, соответствующую отсчету измеренной величины. Обычно указатель представляет собой тонкую стрелку или световое пятно. В современных электроизмерительных приборах отсчетным устройством служит электронное табло с цифровой индикацией, очень удобной для снятия показаний прибора.

Электроизмерительные приборы широко применяют и для измерения неэлектрических величин: температуры, давления, скорости движения, освещенности и т. п. Принцип действия таких приборов основан на связи между электрическими и другими физическими явлениями, обуславливающей возникновение термоэлектрических, фотоэлектрических, электромагнитной индукции и т. п.

На практике часто необходимы косвенные измерения, основанные на законах или закономерностях, устанавливающих зависимость между различными физическими величинами. Например, электрическое сопротивление проводника можно определить, измерив на нем падение напряжения и силу тока.

Электрические измерения производят двумя способами:

- 1) сравнением измеряемой величины с ее соответствующими эталонами ЭДС, сопротивления, емкости, индуктивности и т. п.;
- 2) с помощью приборов, показывающих численные значения измеряемой величины.

По своему назначению основные электроизмерительные приборы можно классифицировать следующим образом:

- амперметры и миллиамперметры – измерители силы тока;
- вольтметры и милливольтметры – измерители напряжения;
- ваттметры – приборы для измерения электрической мощности;
- счетчики электрической энергии – приборы для измерения электрической энергии;

- омметры – приборы для измерения электрического сопротивления;
- частотометры – приборы для измерения частоты переменного тока;
- приборы для измерения емкости и т. п.

По принципу действия электроизмерительные приборы подразделяются на магнитоэлектрические, электромагнитные, электродинамические, тепловые, индукционные, электронные и др.

Одна из основных характеристик электроизмерительного прибора – чувствительность, определяемая отношением линейного или углового перемещения указателя к изменению измеряемой величины. Величина, обратная чувствительности, называется ценой деления прибора. Она определяет значение измеряемой величины при отклонении на одно деление.

2.4. Обработка результатов измерений

После измерительной операции наступает следующая стадия экспериментальной работы – математическая обработка результатов измерений. Все числа, получаемые при измерениях, являются приближенными. Точность измерений нельзя повысить математическими действиями над полученными результатами измерений. Учет большого числа значащих цифр без оценки их достоверности затрудняет вычисления и оказывается бесполезным.

В качестве истинного, наиболее вероятного значения измеряемой величины обычно принимают среднее арифметическое измеренных значений:

$$\langle x \rangle = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \quad (2.1)$$

где x_1, x_2, \dots, x_n – значения измеренной величины; n – число измерений.

После расчета среднего арифметического значения измеряемой величины приступают к определению абсолютной и относительной ошибок измерений.

Абсолютное значение разности между средним арифметическим $\langle X \rangle$ и каждым из отдельных результатов измерений называется *абсолютной ошибкой отдельного измерения* и обозначается

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

Часто *среднюю абсолютную ошибку* определяют как среднее арифметическое абсолютных ошибок отдельных измерений, т. е.

$$\langle \Delta x_i \rangle = \frac{|\Delta x_1| + |\Delta x_2| + \dots + |\Delta x_n|}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n |\Delta x_i|}{n}.$$

Абсолютная ошибка указывает два значения измеряемой величины, между которыми заключено ее истинное значение. Например, в результате измерений и последующих вычислений диаметра проволоки получили:

$$\langle d \rangle = 2,4 \text{ мм и } \langle \Delta d_i \rangle = \pm 0,1 \text{ мм.}$$

Это означает, что истинное значение диаметра проволоки находится в интервале между 2,3 и 2,5 мм.

Можно уменьшить абсолютную ошибку и, следовательно, уменьшить интервал, в котором находится истинное значение измеряемой величины, но абсолютная ошибка не может быть равной нулю.

Для полной характеристики точности измерений рассчитывают относительную ошибку, равную отношению средней абсолютной ошибки к среднему результату измерений:

$$E = \frac{\langle \Delta x_i \rangle}{\langle x \rangle}.$$

Если выполнено достаточно большое число измерений и результаты подчиняются закону статистического распределения, то вместо средней абсолютной ошибки определяется *средняя квадратичная ошибка*

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

Относительная ошибка в данном случае

$$E_s = \frac{S}{\langle x \rangle}.$$

Относительная ошибка – безразмерная величина. Ее часто выражают в процентах, для чего безразмерную величину надо умножить на 100 %.

Если необходимо учитывать как приборную (δ), так и случайную (S_x) ошибки, то *полная абсолютная ошибка среднего значения* измеренной величины

$$\Delta_{\langle x \rangle} = \sqrt{\delta^2 + S_{\langle x \rangle}^2}.$$

Если одна из данных ошибок меньше другой в 4 и более раз, то ее в окончательном результате можно не учитывать.

Для косвенных измерений, когда определяемая величина получается путем вычислений по известной формуле, ошибки в простейших случаях находят следующим образом.

Если определяемая величина A связана с непосредственно измеряемыми величинами B и C выражением

$$A=BC,$$

то относительная ошибка величины A равна сумме относительных ошибок величин B и C , т. е.

$$E=\frac{\Delta B}{B}+\frac{\Delta C}{C},$$

а абсолютная ошибка

$$\Delta A=EA.$$

Относительные ошибки складываются и при делении двух измеряемых величин.

Если же определяемая величина A равна сумме или разности измеряемых величин B и C , т. е. если

$$A=B\pm C,$$

то абсолютная ошибка A равна сумме абсолютных ошибок B и C :

$$\Delta A=\Delta B+\Delta C.$$

Относительная ошибка в данном случае

$$E=\Delta A/A.$$

Окончательный результат измерений обычно записывают в стандартной форме, удобной для анализа:

- вначале записывают название определяемой физической величины;
- затем пишется буквенный символ определяемой величины, знак равенства и в скобках ее среднее значение плюс-минус средняя абсолютная ошибка, а за скобкой указывается единица измерения;
- отдельно записывают значение относительной ошибки в процентах;
- окончательные результаты заключаются в общую рамку.

Среднее значение, полная абсолютная ошибка и относительная ошибка округляются по следующим правилам:

- вначале округляют до одной или двух значащих цифр среднюю абсолютную ошибку (если старшая цифра больше 4, оставляют одну значащую цифру, в остальных случаях — две);
- затем округляют среднее значение до разряда, совпадающего с младшим разрядом абсолютной ошибки;

• относительную ошибку записывают в % с точностью до двух значащих цифр.

Например, запись окончательного результата определения объема цилиндрического тела имеет вид

<p style="text-align: center;">Объем цилиндрического тела $V=(10,43 \pm 0,25) \text{ см}^3$ $E=2,4\%$</p>
--

При совпадении двух результатов, т. е. при установлении их равенства, когда указаны полные абсолютные ошибки, удобно пользоваться следующим правилом определения наличия систематической ошибки: если модуль разности средних значений двух измеренных величин не превышает суммы их абсолютных ошибок, сравниваемые величины можно считать равными или совпадающими в пределах ошибок измерений. В противном случае данные величины считаются неравными или несовпадающими. При таком сравнении в пределах указанных ошибок, если измеренная величина не совпадает, например, с табличной (более точной), можно говорить о наличии в измерениях систематической ошибки.

Рассмотрим два характерных примера решения простейших задач на определение ошибки измерений.

Пример 1. При измерении периода колебаний маятника были получены следующие результаты: $T_1 = 3,1$; $T_2 = 3,2$; $T_3 = 3,0$; $T_4 = 3,5$; $T_5 = 3,3$; $T_6 = 3,2$ с. Определить среднюю квадратичную ошибку периода, относительную ошибку и представить окончательный результат в стандартной форме.

Решение. Вначале находим среднее значение периода:

$$\langle T \rangle = (3,1 + 3,2 + 3,0 + 3,5 + 3,3 + 3,2)/6 = 3,21(6) \approx 3,22 \text{ с.}$$

Округление промежуточного результата произведено до трех значащих цифр.

Далее по формуле

$$\Delta T_i = |\langle T \rangle - T_i|$$

вычисляем абсолютные ошибки отдельных измерений (с):

$$\Delta T_1 = |3,22 - 3,1| = 0,12; \quad \Delta T_2 = |3,22 - 3,2| = 0,02;$$

$$\Delta T_3 = |3,22 - 3,0| = 0,22; \quad \Delta T_4 = |3,22 - 3,5| = 0,28;$$

$$\Delta T_5 = |3,22 - 3,3| = 0,08; \quad \Delta T_6 = |3,22 - 3,2| = 0,02.$$

Затем находим среднюю квадратичную ошибку среднего значения периода

$$S_{\langle T \rangle} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\Delta T_i)^2 / n(n-1)} = \\ = \sqrt{(0,12^2 + 0,02^2 + 0,22^2 + 0,28^2 + 0,08^2 + 0,02^2) / 30} = 0,0703 \text{ с.}$$

Вычисляем относительную ошибку среднего значения периода:

$$E_{\langle T \rangle} = 0,0703 \cdot 100 \% / 3,22 = 2,19 \%.$$

В окончательном результате величину $S_{\langle T \rangle}$ округляем до одной значащей цифры (поскольку старшая значащая цифра равна 7), среднее значение периода – до разряда округленной величины $S_{\langle T \rangle}$, т. е. до сотых долей, а относительную ошибку – до двух значащих цифр.

Ответ:

Период колебаний маятника

$$T = (3,22 \pm 0,07) \text{ с}$$

$$E_{\langle T \rangle} = 2,2\%$$

Пример 2. Равны ли в пределах ошибок измерений определяемое значение плотности жидкости ρ и ее табличное значение ρ_T , если

$$\rho = (0,9567 \pm 0,0003) \text{ г/см}^3;$$

$$\rho_T = (0,9561 \pm 0,0001) \text{ г/см}^3?$$

Имеется ли систематическая ошибка при определении плотности?

Решение. Сумма абсолютных ошибок определенного в результате измерений и табличного значений плотности составляет $0,0004 \text{ г/см}^3$. Эта сумма меньше разности по модулю их средних значений, равной $0,0006 \text{ г/см}^3$. Следовательно, данные результаты нельзя считать равными в пределах ошибок измерений. Так как $\rho > \rho_T$, то в измерениях допущена систематическая ошибка, которая привела к завышенному результату по сравнению с табличным.

Ответ: значения плотности ρ и ρ_T в пределах ошибок измерений не равны; при измерении ρ допущена систематическая ошибка.

Вопросы для самопроверки

- Назовите свойства материальных объектов, трудно поддающиеся количественному описанию.
- Что называется измерением?
- Чем обуславливается невозможность выполнения абсолютно точных измерений?
- Как зависит точность измерений от чувствительности прибора?
- Определение плотности вещества относится к прямым или косвенным измерениям?
- Что обычно принимают в качестве истинного значения измеряемой величины?
- Какие ошибки измерений различают в зависимости от причин, порождающих ошибки?
- Назовите два вида ошибок для оценки истинности измеряемой величины.
- Какова специфика грубых ошибок?
- Дайте краткую характеристику систематических ошибок.
- Каким образом устраняется систематическая ошибка?
- Какие факторы обуславливают случайные ошибки?
- Назовите основные следствия из нормального закона распределения случайных ошибок.
- Что означает цифра класса точности прибора?
- Изменяется ли абсолютная ошибка прибора при отклонении стрелки?
- Для чего применяют нониусы и микрометрические винты?
- Какие минимальные и максимальные расстояния позволяют определить современные измерительные средства?
- На чем основан принцип работы электроизмерительных приборов?
- Применяются ли электроизмерительные приборы для измерения неэлектрических величин?
- Назовите два основных способа электрических измерений.
- Как классифицируют электроизмерительные приборы по назначению?
- Что такое чувствительность прибора?
- Назовите основные правила округления приближенных чисел.
- Как определяется наиболее вероятное значение измеряемой величины?
- Дайте определение средней абсолютной ошибки.
- Как определяется средняя квадратичная ошибка?

- Что такое относительная ошибка?
- Как определяются абсолютная и относительная ошибки для простейших косвенных измерений?
- Сформулируйте правила округления окончательных результатов измерений.
- Приведите пример записи окончательного результата измерений.
- Как определяется наличие систематической ошибки в измерениях.

Задачи по разделу «Погрешности экспериментальных измерений»

1. Измерение длины сторон детали в форме прямоугольного параллелепипеда производилось штангенциркулем с точностью 0,1 мм; результаты измерений: 12,6, 15,3 и 18,7 мм. Определите объем детали. Окончательный результат запишите в стандартной форме с учетом абсолютной и относительной ошибок, а также правил округления.

2. Чему равны абсолютные ошибки отдельных измерений и средняя квадратичная ошибка среднего значения величины A , если при ее измерении были получены следующие результаты: 38,21; 39,11; 37,98; 38,52; 39,32; 37,94; 37,09 с? Какую физическую величину представляет A ?

3. Результаты измерений диаметра диска составляют 42,4; 42,6; 42,8; 42,7; 41,9; 41,8; 42,0 мм. Чему равна площадь диска? Ответ запишите в стандартной форме с учетом правил округления, абсолютной и относительной ошибок.

4. После округления получены следующие результаты измерений: $A = (12,3 \pm 0,2)$ с; $B = (21,3 \pm 0,4)$ мм; $C = (832 \pm 6)$ г. Чему равны относительные ошибки данных результатов? Какие физические величины представляют A , B и C ?

5. Масса тела составляет $(64,2 \pm 0,3)$ г, а его объем $(148,2 \pm 0,3)$ мм³. Найти плотность вещества тела, а также относительную и абсолютную ошибки определения плотности.

6. Определите среднюю квадратичную ошибку и относительную ошибку измерений величины A , если ее среднее значение и абсолютные ошибки отдельных измерений соответственно равны (г):

$$\langle A \rangle = 1150,3; \Delta A_1 = 2,4; \Delta A_2 = 1,8; \Delta A_3 = 0,8;$$

$$\Delta A_4 = 1,5; \Delta A_5 = 1,1; \Delta A_6 = 2,1; \Delta A_7 = 1,9; \Delta A_8 = 2,0 .$$

7. Класс точности прибора равен 1,5. Какова абсолютная ошибка измерений данным прибором, если вся шкала прибора содержит 100 делений, а цена деления 0,1 А.

8. Рассчитать абсолютные и относительные ошибки отдельных измерений величины A , если при ее измерении были получены следующие значения: 2,1; 2,3; 2,0; 2,4 и 2,2 с.

9. Какова относительная ошибка измерений прибором класса точности 1,0 при отклонении стрелки на 10 делений, если вся шкала прибора содержит 200 делений?

10. Чему равны абсолютные ошибки отдельных измерений и относительная ошибка измерений величины A , если известны результаты измерений 230; 228; 232; 233; 235; 229 Н? Какую физическую величину представляет A ?

11. Величины A , B и C связаны между собой соотношением $A = BC$, где $B = (0,96 \pm 0,04)$ Н и $C = (1,6 \pm 0,5)$ м. Рассчитать значение A , его абсолютную и относительную ошибки и представить окончательный результат в стандартной форме с учетом правил округления.

12. Величины A , B и C связаны соотношением $A = B + C$, где $B = (8,53 \pm 0,02)$ Дж и $C = (30,7 \pm 0,3)$ Дж. Рассчитать значение A и написать окончательный результат в стандартной форме. Какую физическую величину представляет A ?

13. Случайная или приборная ошибка преобладает в измерении величины A , если результаты ее измерений равны: 100; 102; 92; 98; 114 с. Приборная ошибка равна 1 с.

14. При определении ускорения свободного падения получен результат $g = (9,82 \pm 0,02)$ м/с². Табличное значение ускорения для данной местности $g_T = (9,84 \pm 0,01)$ м/с². Чему равны относительные ошибки определения g и g_T ? Можно ли утверждать о наличии систематической ошибки при определении g ? Почему?

15. Стоит ли продолжать измерения диаметра проволоки микрометром для получения более точного результата, если измеренные значения равны: 1,38; 1,39; 1,38 и 1,38 мм. Приборная ошибка — 0,01 мм. Чему равна относительная приборная ошибка?

3. ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

3.1. Выполнение и оформление лабораторных работ

Выполняя лабораторную работу, студент самостоятельно получает экспериментальные результаты и оценивает их достоверность. Основу лабораторных работ составляют измерения – неотъемная часть любого эксперимента.

Физическая направленность представленных лабораторных работ обусловлена возможностью с помощью простых измерительных средств получить количественные экспериментальные результаты, что гораздо сложнее сделать, например, в химических и биологических опытах. Кроме того, многие крупные естественно-научные достижения в области химии, биологии и т. п. получены с применением современных физических экспериментальных методов: спектрального анализа, ядерного магнитного резонанса, рентгеноструктурного анализа, нейтронографии и т. д. Практическая реализация таких методов в виде лабораторных работ – сложная задача, и ее решение возможно только с применением моделирования и компьютерной техники.

При выполнении лабораторных работ полезно помнить следующие правила:

- Лабораторную работу следует выполнять самостоятельно. Только в этом случае она окажется интересной и полезной. Описание лабораторных работ – всего лишь ориентир для самостоятельной работы. Успех определяется главным образом не столько изучением описания работы, сколько сознательным отношением к экспериментальным измерениям.

- Необходимое условие для начала выполнения лабораторной работы – ясное понимание сущности изучаемого объекта.

- Главное условие успешного выполнения измерений – внимательное и неторопливое ознакомление с лабораторной установкой и приборами перед измерениями.

- Работу с приборами следует начинать лишь после изучения инструкции и необходимых мер предосторожности. Не следует вскрывать приборы, прикасаться к оптическим и тонким деталям лабораторных установок. Необходимо бережно обращаться с экспериментальным оборудованием.

- В лабораторных работах, содержащих электрические схемы, источник питания подключают после того, как вся схема тщательно проверена и получен

допуск от преподавателя к выполнению измерений. Нарушение данного правила может привести к несчастному случаю.

- Измерения должны производиться с максимальной точностью. Только точные, достоверные результаты позволяют наиболее полно количественно описать изучаемый объект и представляют интерес при их математической обработке.

- При измерениях следует учесть, что некоторые приборы могут существенно изменить физическое состояние исследуемого объекта. Например, при измерении температуры нагретой жидкости в пробирке с помощью ртутного термометра произойдет охлаждение жидкости, термометр покажет вовсе не ту температуру, которую имела жидкость до измерения. Более достоверные результаты в данном случае можно получить, например, при измерении температуры термопарой.

- Стремясь получить достоверную картину изучаемого объекта, следует согласовать точность измерений различных величин. Например, даже при больших изменениях температуры изменение длины стержня относительно мало. Поэтому важно измерять изменение длины стержня с максимально достижимой точностью, и нет смысла измерять температуру, например, до сотых долей градуса.

- В описаниях лабораторных работ обычно указывается приближенное число измерений. Как правило, число измерений устанавливает сам экспериментатор, основываясь на точности приборов и результатах измерений. Если в результатах измерений получен большой разброс, лучше еще раз обратиться к описанию установки, чем продолжать измерения.

- При построении кривой зависимости одной величины от другой плотность числа экспериментальных точек на различных участках кривой выбирается с таким расчетом, чтобы четко изображались изгибы, максимумы и минимумы. На участках плавного хода кривой зависимости плотность точек может быть меньшей.

- Следует стремиться к аккуратности и полноте первичных (черновых) записей при выполнении лабораторных работ. Записи измерений лучше вести в виде таблиц с указанием единиц измеряемых величин. Необходимо записывать точность и чувствительность приборов.

При оформлении лабораторных работ необходимо выполнять ряд правил:

1. Лабораторные работы оформляются в отдельной тетради, на первой странице которой чертится таблица для пометок преподавателя о допуске к лабораторной работе, о выполнении измерений и защите ее.

2. Оформление каждой лабораторной работы начинается с новой страницы. Вначале указывают номер лабораторной работы, ее название, дату выполнения. Затем кратко излагают сущность теории, описание лабораторной установки и основное содержание заданий вместе с таблицами для занесения результатов измерений. Желательно нарисовать схему установки. Затем производят запись обработки результатов измерений и окончательного результата в стандартной форме, указанной в § 1.1.

3. Если в лабораторной работе предусмотрено выполнение графиков, то их следует чертить на миллиметровой бумаге (бумага в клетку для такой цели не совсем подходит). По осям нужно выбрать удобный для нанесения экспериментальных точек масштаб. Кривая на графике проводится таким образом, чтобы были видны отдельные точки, полученные в результате эксперимента. Вначале кривая проводится карандашом, чтобы можно было вносить необходимые поправки при анализе окончательных результатов.

4. При обработке результатов лабораторной работы следует тщательно обдумывать возможные источники ошибок. Сравнивая свои результаты с данными таблиц либо с полученными ранее результатами других студентов, не следует при их несовпадении сразу считать свои результаты ошибочными. В таком случае нужно еще раз продумать методику измерений. При сдаче работы с «плохими» результатами студент после обсуждения с преподавателем часто получает значительно больше пользы, чем при наличии «хороших» результатов.

3.2. Порядок выполнения и защиты лабораторных работ

1. Изучить описание лабораторной работы и оформить ее в лабораторной тетради, оставляя свободные места для занесения результатов измерений, их обработки и окончательного результата.

2. Перед началом выполнения лабораторной работы следует получить допуск-разрешение от преподавателя на выполнение измерений. Если студент показал знание сущности выполняемой работы и порядка измерений, то преподаватель делает пометку «допуск» в таблице его лабораторной тетради.

3. Получив допуск к выполнению работы, студент проводит измерения и заносит их в соответствующие таблицы.

4. Сделав пробный расчет определяемого параметра, студент обязан предъявить результаты измерений преподавателю. Если результаты приняты, преподаватель делает пометку о выполнении измерений в лабораторной тетради студента.

5. Далее производится обработка результатов эксперимента: вычисляются промежуточные и окончательные данные и заносятся в тетрадь.

6. Лабораторная работа считается полностью выполненной, если она защищена. При защите преподаватель вправе спросить не только о сущности выполненной работы и о результатах измерений, но и теоретический материал того раздела, к которому относится данная лабораторная работа. После защиты преподаватель выставляет в тетради студента оценку.

7. Студент, не защитивший две лабораторные работы, к выполнению третьей не допускается.

3.3. Лабораторная работа № 1

«Определение линейных размеров»

Описание измерительных приборов

В данной лабораторной работе используются масштабная линейка, штангенциркуль, микрометр, деталь цилиндрической формы, кусок проволоки.

В повседневной жизни – в быту, на производстве, в торговле и т.п. – довольно часто прибегают к измерению длины, ширины и толщины различных предметов и деталей, т. е. к определению их линейных размеров. Для простейших измерений широко применяются масштабные линейки, штангенциркули и микрометры.

Масштабная линейка. Для определения линейных размеров в пределах от одного сантиметра до нескольких метров часто используют масштабные линейки и рулетки с сантиметровыми и миллиметровыми делениями. Металлические линейки более прочные и точные, чем деревянные или пластмассовые, которые усыхают с течением времени и легче подвергаются разрушению.

Штангенциркуль. В различных отраслях производства, и в особенности в машиностроении, широко применяют штангенциркуль, позволяющий определить линейные размеры небольших деталей и предметов в пределах от 0 до 20 см с точностью до десятых и сотых долей миллиметра.

Штангенциркуль (рис. 3.1) состоит из жесткой металлической линейки (штанги) *1* с миллиметровыми делениями и подвижной части *8* со штоком *9*, которая может передвигаться вдоль линейки. В линейке и подвижной части имеются выступы *3 – 6* для определения внешних *3,4* и внутренних *5, 6* размеров деталей. Подвижная часть закрепляется стопорным винтом *7*.

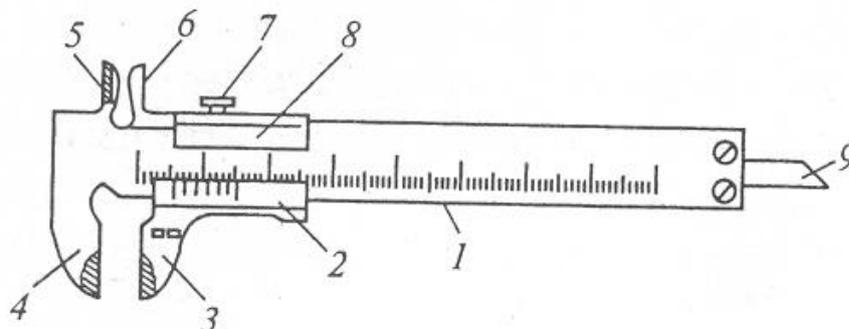


Рис.3.1

На подвижной части штангенциркуля нанесена вспомогательная шкала – *линейный нониус 9* с делениями другого масштаба, чем деления основной шкалы (рис. 3.2, *a*). Нониус позволяет повысить точность измерений в 10 или 20 раз в зависимости от полного числа его делений. Отношение цены деления шкалы основной линейки к числу делений нониуса называется *точностью нониуса*. Точностью нониуса определяется абсолютная ошибка прибора, в котором применяется нониус. Число делений нониуса большинства модификаций штангенциркулей составляет 10 или 20, что позволят измерять линейные размеры соответственно с точностью 0,1 или 0,05 мм.

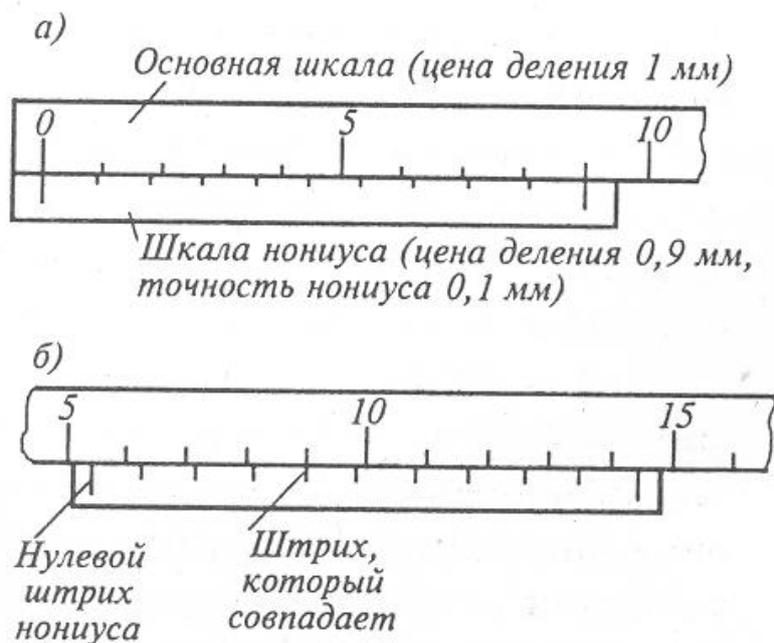


Рис.3.2

Для определения размера детали, например, диаметра детали цилиндрической формы, ее помещают между выступами 4 и 5 штангенциркуля и перемещают подвижную часть 2 до соприкосновения детали с обоими выступами. Затем снимают показание штангенциркуля. Если нулевой штрих шкалы нониуса совпадает с каким-либо штрихом основной миллиметровой шкалы, то измеряемое расстояние равно целому числу миллиметров основной шкалы до нулевого штриха нониуса. Обычно со штрихом основной шкалы совпадает не нулевой штрих нониуса, а другие его штрихи. Измеряемое расстояние в этом случае складывается из целого числа миллиметров основной шкалы слева от нулевого штриха и десятых долей миллиметра, число которых равно номеру штриха нониуса, совпадающего с каким-либо штрихом основной шкалы или близко расположенного от него. Например, показание штангенциркуля, представленное на рис. 3.2, б, соответствует 5,4 мм.

С помощью штангенциркуля можно определить внешние и внутренние размеры деталей, например внешний и внутренний диаметры трубок, а также глубину вырезов и отверстий посредством штока 9, длина выдвигающейся части которого равна расстоянию между выступами 4 и 3 штангенциркуля.

Порядок измерений с помощью приборов с линейным нониусом такой же, как и для приборов с угловым нониусом, которым снабжен, например, теодолит и другие приборы.

Микрометр. Микрометр служит для определения внешних размеров небольших предметов и деталей в пределах от 0 до 25 мм с точностью до 0,01 мм.

Микрометр (рис. 3.3) состоит из стальной скобы 1 с цилиндрическим упором 2 и подвижного цилиндрического стержня 3 с микрометрическим винтом. Плоскость упора 2 параллельна плоскости стержня 3. Положение подвижного стержня фиксируется стопорным винтом 4. Микрометрический винт вращается внутри неподвижной втулки 5 с внутренней резьбой. Шаг резьбы обычно составляет 0,5 мм. На внешней поверхности втулки нанесена продольная шкала 6, состоящая из двух частей, разделенных горизонтальной линией. Нижняя часть служит для отсчета целого числа миллиметров, а верхняя – для отсчета половинных долей миллиметра. На обеих частях шкалы нанесены штрихи через 1 миллиметр. Штрихи верхней шкалы делят каждый миллиметр нижней шкалы пополам.

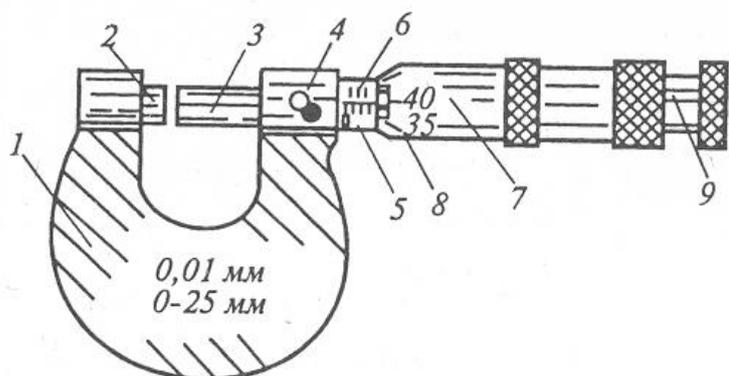


Рис.3.3

На микрометрический винт насажен удлиненный барабан 7, левая скошенная кромка которого перемещается относительно шкалы на втулке. На кромке барабана нанесена круговая шкала 8, содержащая 50 равных делений. На правом конце винта расположена фрикционная головка с трещоткой 9. Конструкция головки такова, что вращательное движение от трещотки передается винту посредством трения, благодаря чему при достижении определенной силы нажима цилиндрического стержня на упор или на

измеряемый предмет дальнейшее вращение прекращается. При одном полном обороте барабан перемещает цилиндрический стержень на 0,5 мм, а поворот барабана на одно деление круговой шкалы соответствует 0,01 мм, т. е. 10 мкм, что и определяет точность прибора.

Перед началом измерений необходимо проверить нулевое положение микрометра, при котором плоскость упора 2 и подвижного стержня 3 соприкасаются друг с другом. Такое соприкосновение обеспечивается вращением по часовой стрелке с помощью фрикционной головки до появления характерного треска от трещотки. В нулевом положении настроенного микрометра нулевой штрих круговой шкалы барабана должен находиться против горизонтальной линии на неподвижной втулке. При нарушении нулевого положения микрометр следует настроить, что может сделать только специалист, или при обработке результатов следует учесть систематическую ошибку, вызванную отклонением от нулевого положения.

Во избежание нарушения настройки микрометра вращательное движение барабана следует осуществлять только с помощью фрикционной головки до появления треска.

Процедура измерения с помощью микрометра следующая: измеряемый предмет помещается между плоскостями цилиндрического упора 2 скобы и подвижного цилиндрического стержня 3. Вращением фрикционной головки до появления треска плоскости упора и подвижного стержня доводятся до соприкосновения с поверхностями измеряемого предмета. Затем снимается показание микрометра. Отсчет производят по нижней линейной шкале на втулке слева от скошенной кромки барабана и по круговой шкале. По нижней линейной шкале отсчитывают число целых миллиметров и их половинные доли, а по круговой шкале – сотые доли миллиметра.

При измерениях возможны два случая:

- скошенная кромка барабана закрывает штрих верхней линейной шкалы, делящей последний миллиметр, отсчитанных по нижней шкале, пополам. В этом случае показания микрометра складываются из целого числа миллиметров, отсчитанного по нижней линейной шкале до кромки барабана, и сотых долей миллиметра, отсчитанных по круговой шкале при совпадении ее штриха с горизонтальной линией продольной шкалы. Например, показание микрометра на рис. 1.4, а соответствует $12 \text{ мм} + 0,33 \text{ мм} = 12,33 \text{ мм}$;

- кромка барабана находится правее штриха верхней линейной шкалы, к показаниям нижней линейной шкалы и круговой шкалы прибавляется 0,50 мм.

Например, на рис. 1.4, б показание микрометра: $13 \text{ мм} + 0,37 \text{ мм} + 0,50 \text{ мм} = 13,87 \text{ мм}$.

Если микрометр не настроен, в показаниях микрометра следует учесть поправку, компенсирующую систематическую ошибку.

Задание 1

Измерение диаметра проволоки микрометром

После получения допуска к выполнению данной лабораторной работы студенты самостоятельно измеряют микрометром диаметр проволоки и затем обрабатывают результаты измерений с учетом правил, изложенных в разделе 2.

Проволока слегка деформирована, поэтому для более полного учета случайных ошибок диаметр измеряется не менее 10 раз и в разных местах проволоки.

Результаты измерений заносятся в табл. 1, начерченную в лабораторной тетради.

Таблица 1

Номер измерения, i	D_i , мм	ΔD_i , мм	Точность микрометра $\delta_1 = \dots$ мм
1			
2			
3			
·			
·			
Средние значения	$\langle D \rangle = \dots$	$\langle \Delta D \rangle = \dots$	Окончательный результат: Диаметр проволоки $D = \langle \Delta D \rangle + \langle D \rangle_{\text{мм}} E_{\langle D \rangle} = \dots\%$

После измерений вычисляют среднее значение диаметра $\langle D \rangle$ и абсолютные ошибки отдельных измерений: $\Delta D_i = |\langle D \rangle - D_i|$.

Промежуточные и окончательные результаты записывают в табл. 1.

Задание 2

Определение объема детали цилиндрической формы

Определение объема цилиндрической детали – пример простейших косвенных измерений. С учетом результатов прямых измерений диаметра D и длины L цилиндрического тела его объем вычисляют по формуле

$$V = \pi \cdot D^2 L / 4.$$

Диаметр цилиндрического тела измеряют микрометром, а его длину – штангенциркулем. Измерения диаметра производят в разных местах цилиндрического тела не менее 10 раз.

Результаты измерений заносятся в табл. 2 в лабораторной тетради.

Таблица 2

Номер измерения, i	D_i , мм	ΔD_i , мм	L_i , мм	ΔL_i , мм
1				
2				
3				
·				
Средние значения	$\langle D \rangle = \dots$	$\langle \Delta D \rangle = \dots$	$\langle L \rangle = \dots$	$\langle \Delta L \rangle = \dots$
Точность штангенциркуля $\delta_1 = \dots$	Точность прибора для измерения диаметра $\delta_1 = \dots$ мм		Точность прибора для измерения длины $\delta_2 = \dots$ мм	

После измерений вычисляют средние значения диаметра $\langle D \rangle$, длины $\langle L \rangle$ цилиндрического тела и их абсолютные ошибки $\langle \Delta D \rangle$ и $\langle \Delta L \rangle$.

Среднее значение объема $\langle V \rangle$ рассчитывают по формуле

$$\langle V \rangle = \pi \langle D \rangle^2 \langle L \rangle / 4.$$

Затем вычисляют относительные ошибки диаметра E_D и длины E_L . Относительную ошибку объема E_V определяют по формуле

$$E_V = \sqrt{(2E_D)^2 + (2E_L)^2},$$

абсолютную ошибку среднего значения объема вычисляют по формуле

$$\Delta V = \langle V \rangle E_V.$$

При вычислении среднего значения объема для исключения дополнительной ошибки при округлении в числе π следует взять не менее пяти значащих цифр, т. е. $\pi = 3,1416$.

Окончательный результат представляют в стандартной форме:

**Объем цилиндрического
тела**
 $V = (\langle V \rangle \pm \Delta V) \text{ мм}^3$
 $E_V = \dots \%$

Контрольные вопросы

1. Для чего служит нониус в штангенциркуле?
2. Какова точность штангенциркуля, с помощью которого производилось измерение длины цилиндрического тела?
3. Как определяется абсолютная ошибка измерения диаметра проволоки, если все показания микрометра совпали?
4. Что такое точность нониуса?
5. Можно ли существенно повысить точность определения объема цилиндрического тела при увеличении числа измерений его диаметра и длины до 20 и более раз?
6. От чего зависит точность штангенциркуля?
7. Длину предмета измеряли штангенциркулем пять раз. Результаты измерений: 6,2; 6,3; 6,4; 6,2 и 6,2 мм. Чему равны абсолютная и относительная ошибки измерений?
8. Как изменится точность нониуса при увеличении числа его делений в два раза?

9. Можно ли скомпенсировать ошибку микрометра, обусловленную смещением нулевого положения?

10. Можно ли считать абсолютно точными результаты измерений диаметра микрометром, если все десять его показаний совпали?

3.4. Лабораторная работа № 2

«Определение плотности вещества»

Общие сведения

Плотность вещества ρ равна отношению его массы m к объему V , т. е.

$$\rho = m/V.$$

Масса m определяется взвешиванием. Объем V твердых тел правильной геометрической формы рассчитывается по известным формулам с учетом измеренных их линейных размеров. Для твердых тел из нерастворимого вещества любой неправильной формы объем находят погружением их в воду, налитую в мензурку. Плотность вещества таких тел часто определяют методом *гидростатического взвешивания*, основанным на взвешивании исследуемого тела в жидкости с известной плотностью. Этот метод применим и для нахождения плотности жидких веществ.

Объем тел из волокнистых, пористых, сыпучих и растворимых в жидкости веществ измеряется газовым объеметром, принцип действия которого основан на законе Бойля–Мариотта.

При равномерном распределении массы в объеме тело считается однородным. Для однородных тел точность определения плотности более высокая, чем для неоднородных. Для неоднородных тел обычно находят среднюю плотность.

Объем тела линейно возрастает с увеличением температуры. Поэтому при определении плотности вещества тела необходимо учитывать температурное изменение его объема.

Описание измерительных приборов

В данной лабораторной работе используются аналитические весы, разновески, рычажные весы, штангенциркуль, микрометр, исследуемый образец цилиндрической формы. Исследуемое тело имеет правильную цилиндрическую форму. Объем его вычисляют по измеренным диаметру и длине. Измерение

диаметра производят микрометром, а длины – штангенциркулем. Описание микрометра и штангенциркуля дано в лабораторной работе №1.

Массу определяют взвешиванием исследуемого тела вначале на рычажных весах, а затем на более чувствительных – аналитических. Для повышения точности взвешивания в рычажных весах применяется опорная призма, выполненная из твердого сплава. Точность аналитических весов составляет десятые доли миллиграмма. В аналитических весах подвижное коромысло опирается призмой на агатовую подушку. Призма имеет заостренную грань; изготавливается она обычно из закаленной стали. К концам коромысла на призмах подвешены чашки весов, на которые помещают взвешиваемое тело и гири (разновески). Призматические опоры коромысла и подвесов позволяют существенно уменьшить трение между подвижными и неподвижными деталями весов и тем самым повысить их точность.

Большинство современных аналитических весов снабжено воздушным демпфером – успокоителем колебаний. При освобождении от арретира – фиксирующего устройств – коромысло весов приходит в колебательное движение, которое без демпфера может продолжаться довольно долго. Весы с демпфером успокаиваются после нескольких колебаний.

Для предохранения призм и опорных подушек от преждевременного износа весы в нерабочем состоянии необходимо арретировать. При арретировании опорная подушка опускается и положение чашки фиксируется.

Механизм арретированных весов обычно располагается в застекленном корпусе с подъемными либо выдвигаемыми стенками, что защищает весы от загрязнения, толчков и воздушных потоков.

Некоторые современные модификации аналитических весов имеют одночашечный механизм с цифровой индикацией, что существенно упрощает считывание показания весов.

Правила пользования аналитическими весами

1. Не пытаться взвешивать на весах относительно тяжелые тела, масса которых превышает допустимую нагрузку, указанную на весах.
2. Изменение нагрузки на чашках весов производить только при арретированных весах.
3. При маятникообразном колебании чашек следует успокоить весы, осторожно их арретируя.
4. Следует пользоваться пинцетом для помещения разновесок и взвешиваемого тела на чашки весов.

5. Запрещается поднимать весы или двигать их, особенно без фиксации арретиром.

6. Необходимо следить за чистотой рабочего места, взвешиваемого тела и чашек весов.

7. После окончания работы необходимо арретировать и разгрузить весы.

Измерения

Измерение линейных размеров. После получения допуска к выполнению данной лабораторной работы студенты самостоятельно приступают к измерениям. Вначале измеряют линейные размеры исследуемого образца цилиндрической формы, а затем его взвешивают.

Диаметр цилиндрического тела D и его длину L измеряют штангенциркулем. Измерения диаметра и длины производят в разных местах цилиндрического тела не менее 10 раз. Результаты измерений D_i и L_i заносятся в табл.1 в лабораторной тетради.

Таблица 1

Номер измерения, i	D_i , мм	ΔD_i , мм	L_i , мм	ΔL_i , мм
1				
2				
3				
⋮				
⋮				
Средние значения	$\langle D \rangle = \dots$	$\langle \Delta D \rangle = \dots$	$\langle L \rangle = \dots$	$\langle \Delta L \rangle = \dots$
Точность штангенциркуля $\delta_1 = \dots$				

Взвешивание. Определение массы m производят взвешиванием образца вначале на рычажных, а потом на аналитических весах. При пользовании двухчашечными весами применяется метод двойного взвешивания, при котором образец взвешивается два раза: сначала на одной, а затем на другой чашке весов. Всего производится 8 взвешиваний на каждом весах. Полученные результаты взвешивания с помощью рычажных и аналитических весов заносятся в отдельные колонки табл. 2 в лабораторной тетради.

Таблица 2

Номер измерения, i	Рычажные весы		Аналитические весы	
	$m_{1i}, \text{г}$	$\Delta m_{1i}, \text{г}$	$m_{2i}, \text{г}$	$\Delta m_{2i}, \text{г}$
1				
2				
·				
Средние значения	$\langle m_1 \rangle = \dots$	$\langle \Delta m_1 \rangle = \dots$	$\langle m_2 \rangle = \dots$	$\langle \Delta m_2 \rangle = \dots$
Точность весов				

Обработка результатов измерений

После измерений вычисляют средние значения диаметра $\langle D \rangle$, длины $\langle L \rangle$, массы $\langle m \rangle$ исследуемого образца, а также их средние абсолютные ошибки $\langle \Delta D \rangle$, длины $\langle \Delta L \rangle$, массы $\langle \Delta m \rangle$. Полученные результаты заносятся соответственно в табл. 1 и 2.

Средние значения плотности $\langle \rho \rangle$ рассчитываются по формуле

$$\langle \rho \rangle = \langle m \rangle / \langle V \rangle = 4 \langle m \rangle / \pi \langle D^2 \rangle \langle L \rangle.$$

Расчет $\langle \rho \rangle$ производят отдельно для значений $\langle m_1 \rangle$ и $\langle m_2 \rangle$, полученных соответственно с помощью рычажных и аналитических весов.

В расчетах среднего значения плотности $\langle \rho \rangle$ для исключения дополнительной ошибки при округлении в числе π следует взять не менее пяти значащих цифр, т. е. $\pi = 3,1416$. Затем вычисляются относительные ошибки диаметра E_D , длины E_L и массы E_m для обоих видов взвешивания.

Относительная ошибка плотности E_ρ определяется по формуле

$$E_\rho = \sqrt{(2E_D)^2 + (2E_L)^2 + (2E_m)^2}.$$

Абсолютная ошибка среднего значения плотности вычисляется по формуле

$$\Delta \rho = \langle \rho \rangle E_\rho.$$

Расчет относительной и абсолютной ошибок производят отдельно для обоих видов взвешивания.

При вычислении промежуточных и окончательных результатов, а также при их округлении и записи следует учесть правила, изложенные в разделе 2.

Окончательный результат представляется в стандартной форме:

Плотность	
Рычажные весы	Аналитические весы
$\rho_1 = (\langle \rho \rangle \pm \Delta \rho) \text{ кг/м}^3$	$\rho_2 = (\langle \rho \rangle \pm \Delta \rho) \text{ кг/м}^3$
$E_{\rho_1} = \dots \%$	$E_{\rho_2} = \dots \%$

Контрольные вопросы

1. Сравните и проанализируйте результаты плотности, абсолютные и относительные ошибки, полученные при определении массы с помощью рычажных и аналитических весов. Сравните рассчитанные и табличные значения плотности, определите, из какого материала изготовлен образец.
2. Определение плотности вещества относится к прямым или косвенным измерениям?
3. Назовите методы определения плотности вещества.
4. Зависит ли плотность вещества от его однородности?
5. Как влияет температура на плотность вещества?
6. Дайте краткую характеристику метода гидростатического взвешивания.
7. Как достигается сравнительно высокая чувствительность аналитических весов?
8. Для чего служит воздушный демпфер?
9. Назовите основные правила пользования аналитическими весами.
10. Зависит ли точность взвешивания от положения груза на чашке весов?
11. Сравните окончательные результаты плотности, дайте аргументированный ответ на вопрос: целесообразно ли взвешивание на аналитических весах при данном методе определения плотности либо можно ограничиться взвешиванием с меньшей точностью на рычажных весах?

4. СПРАВОЧНЫЕ СВЕДЕНИЯ

Вещество и поле.

Основные физические постоянные

Физическая постоянная	Численное значение
Гравитационная постоянная	$G = 6,672 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{кг}^2$
Число Авогадро	$N_A = 6,02205 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$
Молярный объем идеального газа при нормальных условиях	$V_0 = 22,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 / \text{моль}$
Универсальная газовая постоянная	$R = 8,3144 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$
Постоянная Больцмана	$k = 1,3807 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$
Постоянная Планка	$h = 6,6262 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$
Заряд электрона	$e = 1,60219 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
Масса покоя электрона	$m_e = 9,1095 \cdot 10^{-31} \text{ кг} = 5,4858 \cdot 10^{-4} \text{ а.е.м.}$
Масса покоя протона	$m_p = 1,6726 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 1,007276 \text{ а.е.м.}$
Масса покоя нейтрона	$m_n = 1,674958 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 1,008665 \text{ а.е.м.}$
Скорость света в вакууме	$c = 2,997925 \cdot 10^8 \text{ м/с}$

Приставки для образования кратных и дольных единиц

Приставка	Обозначение	Кратность и дольность	Приставка	Обозначение	Кратность и дольность
Пета	П	10^{15}	Деци	д	10^{-1}
Тера	Т	10^{12}	Санتي	с	10^{-2}
Гига	Г	10^9	Милли	м	10^{-3}
Мега	М	10^6	Микро	мк	10^{-6}
Кило	к	10^3	Нано	н	10^{-9}
Гекто	г	10^2	Пико	п	10^{-12}
Дека	да	10^1	Фемто	ф	10^{-15}

СВЯЗЬ ВНЕСИСТЕМНЫХ ЕДИНИЦ С ЕДИНИЦАМИ СИ

Длина

$$1 \text{ ангстрем (А)} = 10^{-10} \text{ м}$$

$$1 \text{ ферми (Фм)} = 10^{-15} \text{ м}$$

$$1 \text{ астрономическая единица длины (а.е.)} = 1,496 \cdot 10^{11} \text{ м}$$

$$1 \text{ световой год (св. год)} = 9,4605 \cdot 10^{15} \text{ м}$$

$$1 \text{ парсек (пк)} = 3,086 \cdot 10^{16} \text{ м}$$

$$1 \text{ морская миля} = 1852 \text{ м}$$

$$1 \text{ дюйм (Д)} = 0,0254 \text{ м}$$

$$1 \text{ фут} = 12 \text{ Д} = 0,3048 \text{ м}$$

Площадь

$$1 \text{ ар (а)} = 100 \text{ м}^2$$

$$1 \text{ гектар (га)} = 100 \text{ а} = 10^4 \text{ м}^2$$

Масса

$$1 \text{ грамм (г)} = 10^{-3} \text{ кг}$$

$$1 \text{ центнер (ц)} = 100 \text{ кг}$$

$$1 \text{ тонна (т)} = 1000 \text{ кг}$$

$$1 \text{ карат (кар)} = 0,2 \text{ г} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ кг}$$

$$1 \text{ атомная единица массы (а.е.м)} = 1,661 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$$

Скорость

$$1 \text{ километр в час (км/ч)} = 0,277 \text{ м/с}$$

$$1 \text{ узел} = 1 \text{ морская миля в час} = 0,514 \text{ м/с}$$

Сила

$$1 \text{ дина (дин)} = 10^{-5} \text{ Н}$$

Давление

$$1 \text{ бар (бар)} = 10^5 \text{ Па}$$

$$1 \text{ миллиметр ртутного столба (мм рт. ст.)} = 1 \text{ торр (Тор)} = 133,3 \text{ Па}$$

$$1 \text{ атмосфера физическая (атм.)} = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

$$1 \text{ атмосфера техническая (ат)} = 9,807 \cdot 10^4 \text{ Па}$$

Энергия

$$1 \text{ эрг (эрг)} = 10^{-7} \text{ Дж}$$

$$1 \text{ киловатт-час (кВт·ч)} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ Дж}$$

$$1 \text{ электрон-вольт (эВ)} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$$

$$1 \text{ калория международная (кал)} = 4,1868 \text{ Дж}$$

Магнитная индукция

$$1 \text{ гаусс (Гс)} = 10^{-4} \text{ Тл}$$

Магнитный поток

$$1 \text{ максвелл (Мкс)} = 10^{-8} \text{ Вб}$$

Напряженность магнитного поля

$$1 \text{ эрстед (Э)} = 79,6 \text{ А/м}$$

Активность радиоактивного источника

1 кюри (Ки) = $3,7 \cdot 10^{10}$ Бк

Экспозиционная доза излучения

1 рентген (Р) = $2,58 \cdot 10^{-4}$ Кл/кг

Поглощенная доза ионизирующего излучения

1 рад (рад) = 0,01 Гр

Эквивалентная доза излучения

1 бэр (бэр) = 0,01 Зв

Основные и дополнительные единицы СИ

Основные единицы СИ. К основным единицам СИ относятся: *метр* – единица длины; *килограмм* – единица массы; *секунда* – единица времени; *ампер* – единица силы тока; *кельвин* – единица температуры; *кандела* – единица силы света; *моль* – количество вещества.

Метр равен длине пути, проходимого светом в вакууме за интервал времени $1/299792458$ секунды.

Килограмм равен массе международного прототипа килограмма, принятого на 1 Генеральной конференции по мерам и весам (ГКМВ) в 1989 г. и подтвержденного ГКМВ в 1991 г.

Секунда равна 9192631770 периодам излучения, соответствующим его переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133 при отсутствии возмущения со стороны внешних полей.

Ампер равен силе неизменяющегося тока, который при прохождении по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малой площади кругового поперечного сечения, расположенным на расстоянии 1 м друг от друга, вызвал бы на каждом участке проводника длиной 1 м силу взаимодействия, равную $2 \cdot 10^{-7}$ Н.

Кельвин равен $1/273,16$ части термодинамической температуры тройной точки воды.

Кандела равна силе света в заданном направлении источника, испускающего излучение частотой $540 \cdot 10^{12}$ Гц, энергетическая сила света которого в этом направлении составляет $1/683$ Вт/с.

Моль равен количеству вещества, содержащему столько же структурных элементов, сколько содержится атомов в углероде-12 массой $0,012$ кг.

Дополнительные единицы. К дополнительным единицам относится радиан и стерadian.

Радиан равен углу между двумя радиусами окружности, длина дуги между которыми равна радиусу.

Стерadian равен телесному углу с вершиной в центре сферы, вырезающему на поверхности сферы площадь, равную площади квадрата со стороной, равной радиусу сферы.

Длина, м

Размер протона	0,000 000 000 000 000 08
Размер атомного ядра	0,000 000 000 03
Диаметр атома водорода	0,000 000 000 03
Диаметр молекулы глюкозы	0,000 000 000 7
Диаметр молекулы ДНК (дезоксирибонуклеиновая кислота)	0,000 000 002
Длина волны красного света	0,000 000 7
Средний диаметр клетки человеческого тела	0,000 05
Диаметр пылинки	0,000 1
Диаметр булавочной головки	0,001
Ширина человеческого ногтя	0,01
Длинный шаг человека	1
Длина пищеварительного тракта человека	10
Диаметр Земли	12 750 000
Путь, который проходит свет в вакууме за 1 секунду	300 000 000
Расстояние от Земли до Солнца	149 500 000 000
Световой год	9 460 000 000 000 000
Расстояние до ближайшей неподвижной звезды	40 200 000 000 000 000
Диаметр Галактики	700 000 000 000 000 000 000
Расстояние от Земли до галактики Туманность Андромеды	10 000 000 000 000 000 000 000
Размеры Вселенной	100 000 000 000 000 000 000 000 000

Неметрические русские единицы

Величина	Единица	Значение в метрических единицах
Длина	миля (7 верст)	7,4676 км
	верста (500 сажений)	1,0668 км
	сажень (3 аршина; 7 футов; 100 соток)	2,1336 м
	сотка	21,336 мм
	аршин (4 четверти; 16 вершков; 28 дюймов)	711,2 мм
	четверть (4 вершка)	177,8 мм
	вершок	44,45 мм
	фут (12 дюймов)	304,8 мм (точно)
	дюйм (10 линий)	25,4 мм (точно)

Величина	Единица	единицах
Площадь	линия (10 точек)	2,54 мм (точно)
	точка	254 мкм (точно)
	квадратная верста	1,13806 км ²
	десятина	10 925,4 м ²
Объем	квадратная сажень	4,55224 м ²
	кубическая сажень	9,7126 м ³
	кубический аршин	0,35973 м ³
	кубический вершок	87,824 см ³
Вместимость	ведро	12,299 дм ³
	четверть (для сыпучих тел)	209,91 дм ³
	четвертик (8 гарнцев; 1/8 четверти)	26,2387 дм ³
	гарнец	3,27984 дм ³
Масса	берковец (10 пудов)	163,805 кг
	пуд (40 фунтов)	16,3805 кг
	фунт (32 лота; 96 золотников)	409,512 г
	лот (3 золотника)	12,7973 г
	золотник (96 долей)	4,26575 г
	доля	44,4349 г
Сила, вес*	берковец (163,805 кгс)	1,60638 Н
	пуд (16,3805 кгс)	160,638 Н
	фунт (0,409512 кгс)	4,01594 Н
	лот (12,7973 гс)	0,125499 Н
	золотник (4,26575 гс)	41,8327 мН
	доля (44,4349 мгс)	0,435758 мН

* Наименования русских единиц силы и веса совпадали с наименованиями русских единиц массы.

Диаметры атомов и молекул, нм

Гелий (He)	0,20	Кислород (O ₂)	0,30
Водород (H ₂)	0,23	Азот (N ₂)	0,30
Водяной пар	0,26	Углекислый газ (CO ₂)	0,33

Масса, кг

Электрон	0,000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 91
Атом водорода	0,000 000 000 000 000 000 000 000 000 001 7
Молекула воды	0,000 000 000 000 000 000 000 000 000 003
Атом урана	0,000 000 000 000 000 000 000 000 000 004
Вирус гриппа	0,000 000 000 000 000 000 000 000 000 006
Красное кровяное тельце	0,000 000 000 0001
Клетка бактерии	0,000 000 000 0012
Крыло мухи	0,000 000 05
Колибри	0,0017
Хоккейная шайба	0,16
Футбольный мяч	0,4
Вода (1 литр при 4 °С)	1
Снаряды для метания:	
мужской диск	2,0
мужское ядро	7,3
Велосипед «Орленок»	13
Критическая масса урана (²³⁵ U)	48
Первый искусственный спутник Земли	83,6
Автомобиль «ВАЗ»	1 000
Товарный вагон	22 600
Металлический пассажирский вагон	54 000
Самый крупный пойманный кит	150 000
Пизанская башня	14 000 000
Останкинская телебашня	55 000 000
Атмосфера Земли	5 100 000 000 000 000 000
Гидросфера Земли	1 400 000 000 000 000 000 000
Луна	74 000 000 000 000 000 000 000
Земля	6 000 000 000 000 000 000 000 000 000
Солнце	2 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000
Галактика	220 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000

Плотность вещества на Земле, кг/м³

Газообразные вещества (при 0 °С и 101,3 кПа)	Водород	0,09
	Гелий	0,179
	Водяной пар, 100 °С	0,88
Жидкости, 20 °С	Хлор	3,22
	Бензин (легкий)	700
	Морская вода	1 020
	Глицерин	1 260
	Серная кислота (концентрированная)	1 830
	Ртуть	13 500

Твердые вещества:	Пробковая кора	150
	Сосна	500
	Лед	900
	Каменный уголь	1 400
	Бетон	2 200
	Алюминий	2 700
	Железо	7 800
	Свинец	11 300
	Золото	19 300
	Иридий	22 400

Скорость, м/с

Человеческая кровь	0,0005 — 0,02
в капиллярах	0,1 — 0,2
в вене	0,2 — 0,5
в артерии	0,7 — 0,9
Эскалатор метро	1,8
Пешеход	3,5 — 5,5
Слабый ветер	3,5 — 6,0
Скоростной лифт	6
Бегун на длинные дистанции (10 000 м)	10
Бегун на короткие дистанции (100 м)	11,5
Конькобежец (10 000 м)	11
Поезд метро	13,1
Конькобежец (100 м)	16
Пассажирский поезд	21 — 24
Очень сильный ветер (буря)	28
Легковой автомобиль	40 — 100
Нервный импульс	90
Пассажирский самолет с поршневыми двигателями	230
Пассажирский самолет с турбореактивными двигателями	1 693
Молекула кислорода при температуре 0 °С (средняя скорость)	2 400
Вторая космическая скорость на Луне	7 800
Космический корабль на орбите вокруг Земли	11 200
Вторая космическая скорость на Земле	30 000
Земля по орбите вокруг Солнца	250 000
Солнце по отношению к центру Галактики	300 000 000
Свет в вакууме	

Температура, °С

Точка абсолютного нуля	- 273,15
Наименьшая, полученная в лаборатории	- 273,14
Кипения гелия	- 268,93
Наименьшая, измеренная на поверхности Луны	- 160
Наименьшая, измеренная на поверхности Земли	- 89,2
Воздуха на высоте 20 км над уровнем моря	- 60
Воздуха на высоте 3 км над уровнем моря	- 5
Таяния льда	0
Плавления цезия	28,5
Нормальная человеческого тела	36,5—37,0
Под землей на глубине 1 км	50
Наибольшая, измеренная на поверхности Земли	57,8
Кипения воды при нормальном давлении	100
Плавления золота	1064
Пламени газовой горелки	1600—1850
Нити лампы накаливания	2500
Плавления вольфрама	3410
Электрической дуги	4000—6000
Поверхности Солнца	6000—2 000 000
В центре Земли	20 000
Наибольшая, полученная в лаборатории	50 000
Короны Солнца	2 000 000
Термоядерной реакции	10 000 000

Свойства некоторых твердых тел

Вещество	Плотность, 10^3 кг/м^3	Температура плавления, °С	Удельная теплоемкость, Дж/(кг · К)	Температурный коэффициент линейного расширения, $10^{-5} \cdot \text{К}^{-1}$
Алюминий	2,6	659	896	2,3
Железо	7,9	1530	500	1,2
Латунь	8,4	900	386	1,9
Медь	8,6	1100	395	1,6
Олово	7,2	232	230	2,7
Платина	21,4	1770	117	0,89
Серебро	10,5	960	234	1,9
Цинк	7,0	420	391	2,9

Свойства некоторых жидкостей при нормальных условиях

Вещество	Химическая формула	Плотность, 10^3 кг/м^3	Удельная теплоемкость при 20°C , Дж/(кг·К)	Вязкость, $10^{-3} \text{ кг/м} \cdot \text{с}$
Вода	H_2O	1,00	4190	1,004
Бензол	C_6H_6	0,879	1720	0,65
Глицерин	$\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$	1,2613	2430	1499
Касторовое масло	—	0,90	1800	950
Спирт этиловый	$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$	0,79	2510	1,20

Удельная теплота сгорания некоторых видов топлива

Вещество	q , Дж/кг	Вещество	q , Дж/кг
<i>Твердые топлива</i>			
Бурый уголь	$9,3 \cdot 10^6$	Каменный уголь	
Древесный уголь	$2,97 \cdot 10^7$	марки А-1	$2,05 \cdot 10^7$
Дрова сухие	$8,3 \cdot 10^6$	марки А-2	$3,03 \cdot 10^7$
Торф	$1,5 \cdot 10^7$	Кокс	$3,03 \cdot 10^7$
		Порох	$3,0 \cdot 10^6$
<i>Жидкие топлива</i>			
Бензин, нефть	$4,6 \cdot 10^7$	Лигроин	$4,33 \cdot 10^7$
Дизельное топливо	$4,2 \cdot 10^7$	Мазут	$4,0 \cdot 10^7$
Керосин	$4,31 \cdot 10^7$	Спирт этиловый	$2,7 \cdot 10^7$
<i>Газообразные топлива</i> (для 1 м^3 при нормальных условиях)			
Генераторный газ	$5,5 \cdot 10^6$	Природный газ	$3,55 \cdot 10^7$
Коксовый газ	$1,64 \cdot 10^7$	Светильный газ	$2,1 \cdot 10^7$

Диэлектрическая проницаемость некоторых веществ

Вещество	ϵ	Вещество	ϵ
Вода	81	Парафин	2
Воздух (при 1 атм)	1,0006	Слюда	6
Вакуум	1	Стекло	6
Воск	7,8	Фарфор	6
Керосин	2,0	Эбонит	2,6

**Удельное электрическое сопротивление,
Ом · м (при 20 °С)**

Проводники		Изоляторы	
Алюминий	$2,7 \cdot 10^{-8}$	Бакелит	10^{16}
провод	$2,87 \cdot 10^{-8}$	Бензол	$10^{15} \dots 10^{16}$
Вольфрам	$5,5 \cdot 10^{-8}$	Бумага	10^{15}
Графит	$8,0 \cdot 10^{-6}$	Вода дистиллированная	10^4
Железо, чистое	$1,0 \cdot 10^{-7}$	Вода морская	0,3
Золото	$2,2 \cdot 10^{-8}$	Дерево, сухое	$10^9 \dots 10^{13}$
Иридий	$4,74 \cdot 10^{-8}$	Земля, влажная	10^2
Константан	$5,0 \cdot 10^{-7}$	Кварцевое стекло	10^{16}
Литая сталь	$1,3 \cdot 10^{-7}$	Керосин	$10^{10} \dots 10^{12}$
Магний	$4,4 \cdot 10^{-8}$	Мрамор	10^8
Манганин	$4,3 \cdot 10^{-7}$	Парафин	$10^{14} \dots 10^{16}$
Медь	$1,72 \cdot 10^{-8}$	Парафиновое масло	10^{14}
провод	$1,78 \cdot 10^{-8}$	Плексиглас	10^{13}
Молибден	$5,4 \cdot 10^{-8}$	Полистирол	10^{16}
Нейзильбер	$3,3 \cdot 10^{-7}$	Полихлорвинил	10^{13}
Никель	$8,7 \cdot 10^{-8}$	Полиэтилен	$10^{10} \dots 10^{13}$
Нихром	$1,12 \cdot 10^{-6}$	Силиконовое масло	10^{13}
Олово	$1,2 \cdot 10^{-7}$	Слюда	10^{14}
Платина	$1,07 \cdot 10^{-7}$	Стекло	10^{11}
Ртуть	$9,6 \cdot 10^{-7}$	Трансформаторное масло	$10^{10} \dots 10^{12}$
Свинец	$2,08 \cdot 10^{-7}$	Фарфор	10^{14}
Серебро	$1,6 \cdot 10^{-8}$	Шифер	10^6
Серый чугун	$1,0 \cdot 10^{-6}$	Эбонит	10^{16}
Угольные щетки	$4,0 \cdot 10^{-5}$	Янтарь	10^{18}
Цинк	$5,9 \cdot 10^{-8}$		

**Температура перехода некоторых веществ
в сверхпроводящее состояние, К**

W	0,01	Sn	3,7	Bi ₂ Pt	0,155
Hf	0,35	Hg	4,1	Ba — Bi — Pb — O	13
Ti	0,4	Ta	4,5	Nb ₃ Sn	18
Cd	0,5	La	4,71	Nb ₃ Ge	23,2
Zn	0,88	V	5,3	La _{2-x} Sr _x CuO ₄	40
Al	1,2	Pb	7,2	Y ₁ Ba ₂ Cu ₃ O _{7-x}	100
In	3,37	Nb	9,22	Ca — Bi — Sr — O	120

Показатели преломления

Вещество	n	Вещество	n
Алмаз	2,42	Сахар	1,56
Ацетон	1,36	Сероуглерод	1,63
Бензол	1,50	Скипидар	1,51
Вода	1,33	Спирт этиловый	1,36
Воздух	1,0003	Стекло (легкий крон)	1,50
Кварц	1,54	Стекло (флинт)	1,6—1,8
Лед	1,31		

Шкала электромагнитных волн

Длина, м	Частота, Гц	Наименование
$10^6—10^4$	$3 \cdot 10^2—3 \cdot 10^4$	Сверхдлинные
$10^4—10^3$	$3 \cdot 10^4—3 \cdot 10^5$	Длинные (радиоволны)
$10^3—10^2$	$3 \cdot 10^5—3 \cdot 10^6$	Средние (радиоволны)
$10^2—10^1$	$3 \cdot 10^6—3 \cdot 10^7$	Короткие (радиоволны)
$10^1—10^{-1}$	$3 \cdot 10^7—3 \cdot 10^9$	Ультракороткие
$10^{-1}—10^{-2}$	$3 \cdot 10^9—3 \cdot 10^{10}$	Телевидение (СВЧ)
$10^{-2}—10^{-3}$	$3 \cdot 10^{10}—3 \cdot 10^{11}$	Радиолокация (СВЧ)
$10^{-3}—10^{-6}$	$3 \cdot 10^{11}—3 \cdot 10^{14}$	Инфракрасное излучение
$10^{-6}—10^{-7}$	$3 \cdot 10^{14}—3 \cdot 10^{15}$	Видимый свет
$10^{-7}—10^{-9}$	$3 \cdot 10^{15}—3 \cdot 10^{17}$	Ультрафиолетовое излучение
$10^{-9}—10^{-12}$	$3 \cdot 10^{17}—3 \cdot 10^{20}$	Рентгеновское излучение (мягкое)
$10^{-12}—10^{-14}$	$3 \cdot 10^{20}—3 \cdot 10^{22}$	Гамма-излучение (жесткое)
$\leq 10^{-14}$	$\geq 3 \cdot 10^{22}$	Космические лучи

Скорость света в различных средах, км/с

Вакуум	300 000	Флинтглас	186 000
Воздух	300 000	Сероуглерод	184 000
Вода	225 000	Алмаз	124 000
Кронглас	198 000	Канадский бальзам	198 000

Яркость некоторых источников света, кд/см²

Ночное небо	10^{-7}
Облачное небо	до 0,3
Голубое небо	до 1
Луна	0,25
Солнце у горизонта	600

Солнце в полдень	до 150 000
Люминесцентная лампа	0,2—0,4
Пламя свечи	до 1
Вольфрамовая лампа накаливания, матовая	5—40
Вольфрамовая лампа накаливания, прозрачная	200—3 000
Электрическая угольная дуга	до 18 000
Ртутная лампа высокого давления	25 000—150 000
Ксеноновая лампа высокого давления	50 000—1 000 000

Периоды полураспада некоторых радиоактивных элементов

Элемент	Период полураспада	Элемент	Период полураспада
${}_{20}\text{Ca}^{45}$	164 сут	${}_{85}\text{Ra}^{226}$	1590 лет
${}_{38}\text{Sr}^{90}$	28 лет	${}_{92}\text{U}^{235}$	$7,1 \cdot 10^8$ лет
${}_{84}\text{Po}^{210}$	138 сут	${}_{92}\text{U}^{238}$	$4,5 \cdot 10^9$ лет
${}_{86}\text{Rn}^{222}$	3,82 сут	${}_{90}\text{Th}^{232}$	$1,39 \cdot 10^{11}$ лет

Массы некоторых изотопов

Изотоп	Масса, а.е.м.	Изотоп	Масса, а.е.м.
${}_{1}\text{H}^1$	1,00814	${}_{4}\text{Be}^9$	9,01505
${}_{1}\text{H}^2$	2,01474	${}_{5}\text{B}^{10}$	10,01612
${}_{1}\text{H}^3$	3,01700	${}_{6}\text{C}^{12}$	12,00380
${}_{2}\text{He}^3$	3,01699	${}_{8}\text{O}^{17}$	17,00453
${}_{2}\text{He}^4$	4,00388	${}_{20}\text{Ca}^{40}$	39,97542
${}_{3}\text{Li}^7$	7,01823	${}_{27}\text{Co}^{56}$	55,95769
${}_{4}\text{Be}^7$	7,01916	${}_{92}\text{U}^{235}$	235,11750
${}_{4}\text{Be}^8$	8,00785	${}_{92}\text{U}^{238}$	238,12376

Кислоты и их соли

Кислота	Формула	Соль (название и пример)
Азотистая	HNO_2	Нитрит; нитрит калия KNO_2
Азотная	HNO_3	Нитрат; нитрат натрия NaNO_3
Бромистоводородная	HBr	Бромид; бромид натрия NaBr
Дихромовая	$\text{H}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$	Дихромат; дихромат калия $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$
Иодистоводородная	HI	Иодид; иодид калия KI
Марганцовая (VII) (перманганатная)	HMnO_4	Манганат (VII) (перманганат); калия манганат (VII) (перманганат калия) KMnO_4
Метафосфорная	$(\text{HPO}_3)_n$	Метафосфат; метафосфат калия $(\text{KPO}_3)_n$
Метакремниевая	$(\text{H}_2\text{SiO}_3)_n$	Метасиликат; метасиликат натрия $(\text{Na}_2\text{SiO}_3)_n$

Планета Земля

Экваториальный радиус	6378,160 км
Полярный радиус	6356,777 км
Средний радиус	6371,032 км
Масса	$5,976 \cdot 10^{24}$ кг
Объем	$1,083 \cdot 10^{12}$ км ³
Средняя плотность	5518 кг/м ³
Скорость вращения (φ — географическая широта)	$0,4651 \cos \varphi$ км/с
Средняя скорость обращения вокруг Солнца	29,765 км/с
Среднее расстояние от Солнца	149,6 млн км
Эксцентриситет орбиты	0,0167
Ускорение силы тяжести на поверхности	9,80665 м/с ²
Центробежное ускорение на экваторе	0,033915 м/с ²
Первая космическая скорость	7,9 км/с
Вторая космическая (параболическая) скорость	11,2 км/с
Общая площадь поверхности	510,2 млн км ²
Площадь материков и островов	149,1 млн км ² = 29,2 % земной поверхности
Площадь океанов	361,1 млн км ² = 70,8 % земной поверхности
Средняя высота материков (над уровнем моря)	860 м
Средняя глубина океанов	3700 м
Масса воды океанов	$1,45 \cdot 10^{21}$ кг

Некоторые астрономические величины*

Радиус Земли	$6,37 \cdot 10^6$ м
Плотность Земли	5500 кг/м ³
Масса Земли	$5,98 \cdot 10^{24}$ кг
Радиус Солнца	$6,95 \cdot 10^8$ м
Масса Солнца	$1,97 \cdot 10^{30}$ кг
Радиус Луны	$1,74 \cdot 10^6$ м
Масса Луны	$7,3 \cdot 10^{22}$ кг
Масса Марса	$6,4 \cdot 10^{23}$ кг
Расстояние до Луны	$3,8 \cdot 10^8$ м
Расстояние до Солнца	$1,5 \cdot 10^{11}$ м
Период обращения Луны вокруг Земли	27 сут 7 ч 43 мин
Средняя плотность Солнца	1400 кг/м ³

* В таблице приведены средние значения величин.

**Ориентировочные значения основных допускаемых напряжений
на растяжение и сжатие**

Материал	Допускаемое напряжение, кгс/см ² , на	
	растяжение	сжатие
Чугун серый в отливках	280—800	1200—1500
Сталь Ст2	1400	
» Ст3	1600	
» Ст3 в мостах	1400	
» машиностроительная (конструкционная) углеродистая	600—2500	
Сталь машиностроительная (конструкционная) легированная	1000—4000 и выше	
Медь	300—1200	
Латунь	700—1400	
Бронза	600—1200	
Алюминий	300—800	
Алюминиевая бронза	800—1200	
Дуралюмин	800—1500	
Текстолит	300—400	
Гетинакс	500—700	
Бакелизированная фанера	400—500	
Сосна вдоль волокон	70—100	100—120
» поперек »	—	15—20
Дуб вдоль волокон	90—130	130—150
» поперек »	—	20—35
Кирпичная »	до 2	4—40
Бетон	1—7	6—25
		10—90

ПЕРИОДИЧЕСКАЯ ТАБЛИЦА ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА

ПЕРИОДЫ	ГРУППЫ												
	А I Б	А II Б	А III Б	А IV Б	А V Б	А VI Б	А VII Б	А	VIII Б				
1	H						H ¹ 1,00794 ВОДОРОД	He ² 4,002602 ГЕЛИЙ	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content;"> <p style="font-size: small;">Атомная масса Атомный номер</p> <div style="display: flex; align-items: center; justify-content: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-right: 5px;">U</div> <div style="text-align: center;"> <p>92</p> <p>238,0289 ± 1</p> </div> </div> <p style="font-size: x-small; text-align: center;">Распределение электронов по оболочкам</p> </div>				
2	Li ³ 6,941 ЛИТИЙ	Be ⁴ 9,01218 БЕРИЛИЙ	B ⁵ 10,811 БОР	C ⁶ 12,011 УГЛЕРОД	N ⁷ 14,0067 АЗОТ	O ⁸ 15,9994 КИСЛОРОД	F ⁹ 18,998403 ФТОР	Ne ¹⁰ 20,179 НЕОН					
3	Na ¹¹ 22,98977 ± НАТРИЙ	Mg ¹² 24,305 МАГНИЙ	Al ¹³ 26,98154 АЛЮМИНИЙ	Si ¹⁴ 28,0855 КРЕМНИЙ	P ¹⁵ 30,97376 ФОСФОР	S ¹⁶ 32,066 СЕРА	Cl ¹⁷ 35,453 ХЛОР	Ar ¹⁸ 39,948 АРГОН					
4	K ¹⁹ 39,0983 КАЛИЙ	Ca ²⁰ 40,078 КАЛЬЦИЙ	Sc ²¹ 44,95591 СКАНДИЙ	Ti ²² 47,88 ТИТАН	V ²³ 50,9415 ВАНАДИЙ	Cr ²⁴ 51,9961 ХРОМ	Mn ²⁵ 54,9380 МАРГАНЕЦ	Fe ²⁶ 55,847 ЖЕЛЕЗО	Co ²⁷ 58,9332 КОБАЛЬТ	Ni ²⁸ 58,69 НИКЕЛЬ			
	Cu ²⁹ 63,546 МЕДЬ	Zn ³⁰ 65,39 ЦИНК	Ga ³¹ 69,723 ГАЛЛИЙ	Ge ³² 72,61 ГЕРМАНИЙ	As ³³ 74,9216 МЫШЬЯК	Se ³⁴ 78,96 СЕЛЕН	Br ³⁵ 79,904 БРОМ	Kr ³⁶ 83,80 КРИПТОН					
5	Rb ³⁷ 85,4678 РУБИДИЙ	Sr ³⁸ 87,62 СТРОНЦИЙ	Y ³⁹ 88,9059 ИТРИЙ	Zr ⁴⁰ 91,224 ЦИРКОНИЙ	Nb ⁴¹ 92,9064 НИОБИЙ	Mo ⁴² 95,94 МОЛИБДЕН	Tc ⁴³ [98] ТЕХНЕЦИЙ	Ru ⁴⁴ 101,07 РУТЕНИЙ	Rh ⁴⁵ 102,9055 РОДИЙ	Pd ⁴⁶ 106,42 ПАЛЛАДИЙ			
	Ag ⁴⁷ 107,8682 СЕРЕБРО	Cd ⁴⁸ 112,41 КАДМИЙ	In ⁴⁹ 114,82 ИНДИЙ	Sn ⁵⁰ 118,710 ОЛОВО	Sb ⁵¹ 121,75 СУРЬМА	Te ⁵² 127,60 ТЕЛЛУР	I ⁵³ 126,9045 ИОД	Xe ⁵⁴ 131,29 КСЕНОН					
6	Cs ⁵⁵ 132,9054 ЦЕЗИЙ	Ba ⁵⁶ 137,33 БАРИЙ	La ⁵⁷ 138,9055 ЛАНТАН	Hf ⁷² 178,49 ГАФНИЙ	Ta ⁷³ 180,9479 ТАНТАЛ	W ⁷⁴ 183,84 ВОЛЬФРАМ	Re ⁷⁵ 186,207 РЕНИЙ	Os ⁷⁶ 190,2 ОСМИЙ	Ir ⁷⁷ 192,22 ИРИДИЙ	Pt ⁷⁸ 195,08 ПЛАТИНА			
	Au ⁷⁹ 196,9665 ЗОЛОТО	Hg ⁸⁰ 200,59 РУТУТЬ	Tl ⁸¹ 204,383 ТАЛЛИЙ	Pb ⁸² 207,2 СВИНЕЦ	Bi ⁸³ 208,9804 ВИСМУТ	Po ⁸⁴ [209] ПОЛОНИЙ	At ⁸⁵ [210] АСТАТ	Rn ⁸⁶ [222] РАДОН					
7	Fr ⁸⁷ [223] ФРАНЦИЙ	Ra ⁸⁸ [226] РАДИЙ	Ac ⁸⁹ [227] АКТИНИЙ	Rf ¹⁰⁴ [261] РЕЗЕРФОРДИЙ	Db ¹⁰⁵ [262] ДУБИНИЙ	Sg ¹⁰⁶ [266] СНБОРГИЙ	Bh ¹⁰⁷ [267] БОРИЙ	Hs ¹⁰⁸ [269] ХАССИЙ	Mt ¹⁰⁹ [268] МЕНТЕНРИЙ				
* ЛАНТАНОИДЫ													
Ce ⁵⁸ 140,12 ЦЕРИЙ	Pr ⁵⁹ 140,9077 ПРАЗЕОДИМ	Nd ⁶⁰ 144,24 НЕОДИМ	Pm ⁶¹ [145] ПРОМЕТИЙ	Sm ⁶² 150,36 САМАРИЙ	Eu ⁶³ 151,96 ЕВРОПИЙ	Gd ⁶⁴ 157,25 ГАДОЛИНИЙ	Tb ⁶⁵ 158,9254 ТЕРБИЙ	Dy ⁶⁶ 162,50 ДИСПРОЗИЙ	Ho ⁶⁷ 164,9304 ГОЛЬМИЙ	Er ⁶⁸ 167,26 ЭРБИЙ	Tm ⁶⁹ 168,9342 ТУЛИЙ	Yb ⁷⁰ 173,04 ИТТЕРБИЙ	Lu ⁷¹ 174,967 ЛУТЕЦИЙ
** АКТИНОИДЫ													
Th ⁹⁰ 232,0381 ТОРИЙ	Pa ⁹¹ [231] ПРОТАКТИНИЙ	U ⁹² 238,0289 УРАН	Np ⁹³ [237] НЕПТУНИЙ	Pu ⁹⁴ [244] ПУТОНИЙ	Am ⁹⁵ [243] АМЕРИЦИЙ	Cm ⁹⁶ [247] КУРИЙ	Bk ⁹⁷ [247] БЕРКЛИЙ	Cf ⁹⁸ [251] КАЛИФОРНИЙ	Es ⁹⁹ [252] ЭЙНШТЕЙНИЙ	Fm ¹⁰⁰ [257] ФЕРМИЙ	Md ¹⁰¹ [258] МЕНДЕЛЕВИЙ	No ¹⁰² [259] НОБЕЛИЙ	Lr ¹⁰³ [260] ЛОУРЕНСИЙ

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горохов В.Г. Концепции современного естествознания и техники / В.Г. Горохов. М.: ИНФРА-М, 2000. 608 с.
2. Воронов В.К. Основы современного естествознания / В.К. Воронов, М.В. Гречнева, Р.З. Сагдеев. М.: Высш. шк., 1999. 247 с.
3. Карпенков С.Х. Концепции современного естествознания / С.Х. Карпенков. М.: Высш. шк., 2003. 334 с.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. РЕАЛИЗАЦИЯ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАДАНИЙ ПО РАЗДЕЛАМ ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ	6
1.1. НЕРЕЛЯТИВИСТСКОЕ ДВИЖЕНИЕ	7
<i>Задачи по разделу «Нерелятивистское движение».....</i>	<i>8</i>
1.2. ГРАВИТАЦИОННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ.....	10
<i>Задачи по разделу «Гравитационное взаимодействие»</i>	<i>10</i>
1.3. ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ.....	12
<i>Задачи по разделу «Законы сохранения».....</i>	<i>14</i>
1.4. ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ.....	15
<i>Задачи по разделу «Тепловые процессы».....</i>	<i>17</i>
1.5. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ.....	19
<i>Задачи по разделу «Электромагнитные явления»</i>	<i>22</i>
1.6. КОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ И ВОЛНОВЫЕ ПРОЦЕССЫ.....	24
<i>Задачи по разделу «Колебательные и волновые процессы».....</i>	<i>30</i>
1.7. РЕЛЯТИВИСТСКОЕ ДВИЖЕНИЕ.....	32
<i>Задачи по разделу «Релятивистское движение».....</i>	<i>34</i>
1.8. КОРПУСКУЛЯРНО-ВОЛНОВЫЕ СВОЙСТВА	34
<i>Задачи по разделу «Корпускулярно-волновые свойства»</i>	<i>35</i>
2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ	36
2.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ	36
2.2. ОШИБКИ ИЗМЕРЕНИЙ	37
2.3. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ	41
2.4. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ	43
<i>Задачи по разделу «Погрешности экспериментальных измерений»</i>	<i>49</i>
3. ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ	51
3.1. ВЫПОЛНЕНИЕ И ОФОРМЛЕНИЕ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ	51
3.2. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ И ЗАЩИТЫ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ.....	53
3.3. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1.....	54
«ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЛИНЕЙНЫХ РАЗМЕРОВ»	54
3.4. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2.....	62
«ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ВЕЩЕСТВА»	62
4. СПРАВОЧНЫЕ СВЕДЕНИЯ.....	63
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	78

Учебное издание

Кузнецова Елена Владимировна

Специальные разделы естествознания

Учебно-методическое пособие

Редактор и корректор И.Н. Жеганина

Лицензия Л Р № 020370

Подписано в печать 30.11.2006.

Формат 60x90/16. Усл. печ. л. 5,0. Тираж 50. Уч.-изд. Л. 6,25. Заказ 185/2006

Издательство

Пермского государственного технического университета

Адрес: 614990, Пермь, Комсомольский пр.,29, к.113

Тел. (342)2198-033, 2198-211