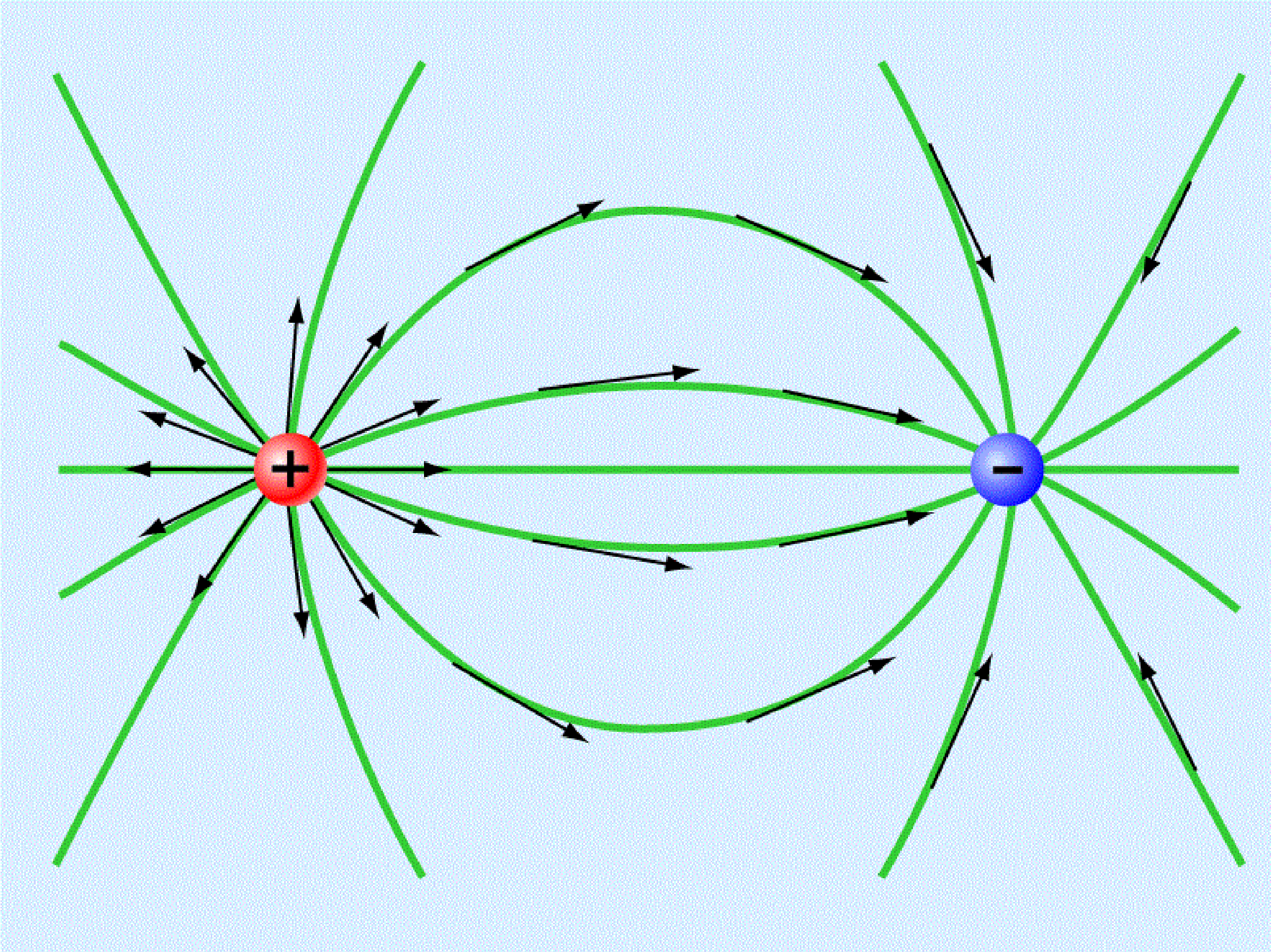


ФИЗИКА

Хабаровск 2012

Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования

«Тихоокеанский государственный университет»

ФИЗИКА

Учебное пособие по физике для студентов технических специальностей заочной формы обучения

Составители: Фёдорова А.П.

Крамарь Е.И.

Воронкова А.В.

Хабаровск

Издательство ТОГУ

2012

УДК 534.1(076.5)

Физика: учебное пособие по физике для студентов технических специальностей заочной формы обучения. / сост. А.П. Фёдорова, Е.И. Крамарь, А.В. Воронкова. - Хабаровск : Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2012.- с.

Учебное пособие составлено на кафедре “Физика”. Включает общие сведения по основным вопросам физики, примеры решения задач, задачи для самостоятельного решения, табличные данные и справочную информацию общенаучного характера.

Печатается в соответствии с решениями кафедры «Физика» и методического совета факультета компьютерных и фундаментальных наук.

Главный редактор *Л.А. Суевалова*

Редактор

Оператор компьютерной верстки *Комина О.Ю.*

Подписано в печать (, Формат 60 х 84 1/16. Бумага писчая.. Гарнитура «Таймс».

Печать цифровая. Усл. печ. . Тираж экз. Заказ

Издательство Тихоокеанского государственного университета.

680035, Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136.

Отдел оперативной полиграфии издательства Тихоокеанского государственного университета.

680035, Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136.

УДК 530.1

ББК В3я7

Ф503

Авторы:

Фёдорова А.П., Крамарь Е.И., Воронкова А.В.

Рецензенты:

Кафедра физики Хабаровского государственного гуманитарного университета (завкафедрой д-р физ.-мат. наук, проф. *В.И. Крылов*);

завкафедрой прикладной математики Дальневосточного

государственного университета путей сообщения

д-р техн. наук, проф. *А.И. Кондратьев*

Ф503 **Физика:** учебное пособие/ А.П. Фёдорова (и др.); под ред. А.П. Фёдоровой. – Хабаровск : Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2012. – с.

ISBN 978-5-7389-0607-7

Учебное пособие включает теоретическую информацию по основным разделам физики, примеры решения задач, задачи для самостоятельного решения, справочный материал по физике и математике.

Пособие предназначено для студентов технических специальностей заочной формы обучения.

УДК 530.1

ББК В3я7

ISBN 978-5-7389-0607-7

Оглавление

Предисловие

Данное учебное пособие предназначено для студентов – заочников инженерно-технических направлений, изучающих физику в соответствии с учебными планами бакалавриата. Пособие составлено на основе многолетнего опыта преподавания физики студентам – заочникам на кафедре физики Тихоокеанского государственного университета (Хабаровского политехнического института). При составлении пособия авторы опирались на примерную программу дисциплины «физика» федерального компонента цикла общих математических и естественнонаучных дисциплин для ФГОС 3-го поколения, рекомендованную научно-методическим советом по физике Министерства образования и науки Российской Федерации. Пособие рассчитано на «Минимальный уровень», предусмотренный данной программой – 9-11 зачетных единиц (~ 300 часов). «Минимальный уровень» предполагает способность воспроизводить типовые ситуации, использовать их в решении простейших задач. На этом уровне рассматриваются только модельные представления, описывающие достаточно ограниченный круг экспериментальных ситуаций. Изучение данного пособия должно помочь студентам, самостоятельно изучающим физику решать типовые задачи по основным разделам физики с целью более полного усвоения теоретического материала.

Объективно, знания школьного курса по физике и математике на момент поступления в вуз студентов – заочников достаточно низкие, что препятствует изучению предмета по учебникам, предназначенным для высшей школы. С другой стороны, сокращение времени обучения бакалавров по сравнению со специалистами и, соответственно, уменьшение времени аудиторных занятий и консультаций не дает возможности преподавателям индивидуально направлять студентов в освоении учебной программы. Перечисленные трудности в основном определяют структуру учебно – справочного пособия, состоящего из трех независимых частей, соответствующих программе трехсеместрового курса физики технических направлений (бакалавры).

Основные задачи курса

1. Развитие культуры мышления, способности восприятия, анализа и обобщения информации.
2. Стимулирование стремления к саморазвитию; развитие способности логически ясно и аргументировано строить письменную и устную речь.
3. Создание основ подготовки в области физики, позволяющих ориентироваться в потоке научной и технической информации и

обеспечивающих возможность использования физических принципов в технике и производстве.

4. Усвоение основных физических явлений и законов классической и современной физики, методов физических исследований.
5. Ознакомление с научной аппаратурой и выработка начальных навыков проведения экспериментальных исследований физических явлений.

Теоретическая часть каждого раздела начинается с формулировки основных понятий и законов физики, что компенсирует пробелы в школьных занятиях и готовит базу для осознанного освоения предмета. Материал излагается коротко в наиболее доступной форме, при необходимости иллюстрируются рисунками.

Каждый раздел заканчивается примером решения задач, в котором подробно поясняется применение соответствующих законов и понятий физики, а также напоминаются необходимые понятия, правила и законы математики. Все решения задач даются в общем виде без промежуточных вычислений и заканчиваются рабочей формулой, что тренирует логическое мышление и приучает к культуре письменного изложения мыслей.

Предлагаемые задачи для самостоятельного решения являются индивидуальными, имеют схожий с примерами алгоритм решения и предполагают творческий элемент действия.

Учебное пособие заканчивается приложением, содержащим табличные данные и полезную справочную информацию общенаучного характера.

Приведенные в пособии задачи для самостоятельного решения могут быть использованы для формирования 10 вариантов контрольных работ для студентов заочной формы обучения, а также составления контрольных работ, решаемых в аудитории.

Данное пособие может быть использовано при проведении практических занятий со студентами очной формы обучения и рекомендовано студентам для самостоятельной подготовки к занятиям по физике.

Подготовкой пособия были заняты сотрудники кафедры физики ТОГУ: Воронкова А.В. (подбор задач: часть II №№ 1-10, 21-40, часть III №№ 11-30, 41-50); Крамарь Е.И. (подбор задач: часть I №№ 1-40, часть II № 51-60, часть III № 51-60); Фёдорова А.П. (общее редактирование, предисловие, введение, теоретический текст, примеры решения задач, подбор задач: часть I №№ 41-50, часть II №№ 11-20, 41-50, часть III №№ 1-10, 31-40, табличные данные, приложение).

Авторы пособия признательны профессору Римлянду В.И., доцентам Кирюшину А.В. и Щербакову Ю.И., прочитавшим рукопись и сделавшим полезные замечания.

Введение

Физика, как и другие естественные науки, изучает объективные свойства окружающего материального мира. В настоящее время изучается две формы материи: вещество (в твердом, жидком, газообразном, плазменном и сверхсжатом состоянии) и поле (гравитационное, действие которого существенно проявляется в мире больших тел; электромагнитное, проявляющееся и в макро- и микромире; специфические сильные и слабые поля, действующие заметным образом только в микромире между частицами, находящимися на малых расстояниях друг от друга).

Вещество – это то, из чего состоят все тела в природе.

Поле – такая форма материи, посредствам которой осуществляется взаимодействие между телами.

Движением материи называются любые ее изменения в пространстве и времени. Физика изучает простейшие, но в то же время фундаментальные, виды движения материи: механическое, волновое, атомно-молекулярное и т.д.

Все установленные физические законы, все физические теории в своей основе базируются (хотя бы косвенно) на опыте. Результаты наблюдений и экспериментов обобщены и сформулированы в виде законов. Критерием верности законов является их согласие с опытом. Все законы физики имеют границы применения, т.к. представляют некоторое приближенное отображение действительных явлений, происходящих в мире. Во всех явлениях есть существенные и несущественные характеристики и связи. Основой всякого изучения является умение отделить существенное от несущественного в данных условиях и сконцентрировать внимание на главном.

Понятием физической величины называется соотношение, в котором подчеркивается ее особенность и дается способ определения ее физического значения.

Законом называется почерпнутый из опытов факт, справедливый для большого круга явлений.

Физические понятия, законы, методы исследования в силу их большой общности проникают в другие разделы естествознания (химию, биологию, астрономию и т.д.). Современная техника, индустрия немыслимы в отрыве от физики.

Знание и понимание законов физики позволяет без существенных усилий воспринимать внедряемые в производство новые технологии, способствует профессиональной мобильности любого специалиста.

ЧАСТЬ I.

Механика. Молекулярная физика и термодинамика.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА
МЕХАНИКА

Кинематика материальной точки

Материальная точка. Твердое тело. Система отсчета. Траектория. Длина пути. Скорость. Ускорение. Нормальное и тангенциальное ускорения. Кинематика вращательного движения. Угловая скорость. Угловое ускорение. Равнопеременное движение.

Динамика материальной точки и поступательного движения твердого тела

Первый закон Ньютона. Масса. Импульс. Сила. Второй закон Ньютона. Уравнение движения материальной точки. Третий закон Ньютона. Силы трения. Коэффициент трения. Закон сохранения импульса.

Кинематика и динамика вращательного движения твердого тела

Момент силы. Момент импульса механической системы. Момент инерции. Закон динамики вращательного движения. Уравнения динамики вращательного движения твердого тела. Закон сохранения момента импульса. Кинетическая энергия вращающегося тела.

Работа и энергия

Работа силы и ее выражение через криволинейный интеграл. Геометрический смысл работы. Кинетическая энергия тела. Связь между изменением этой энергии и работой результирующей всех сил, действующих на тело. Консервативные и диссипативные силы. Потенциальная энергия. Связь между изменением этой энергии и работой потенциальных сил. Закон сохранения механической энергии. Потенциальная энергия тяготения.

Основы специальной теории относительности

Преобразования Галилея. Механический принцип относительности. Постулаты специальной теории относительности. Преобразования Лоренца. Относительность промежутков времени. Замедление времени, измеряемого движущимися часами. Длина тела в разных системах отсчета. Релятивистский закон сложения скоростей. Релятивистская масса. Масса покоя. Закон взаимосвязи (пропорциональности) массы и энергии. Полная энергия тела. Энергия покоя. Энергия связи системы.

Деформации твердых тел

Упругие и пластические деформации. Закон Гука. Деформация сдвига. Модуль сдвига. Деформация кручения. Закон Гука для деформации кручения. Модуль кручения. Потенциальная энергия упругой деформации.

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА

Уравнение состояния идеального газа

Два метода описания макроскопических систем: статистический и термодинамический. Термодинамические параметры (параметры состояния). Давление. Температура. Равновесное состояние. Модель идеального газа. Опытные законы идеального газа. Уравнение Менделеева - Клапейрона. Постоянная Авогадро. Универсальная газовая постоянная. Постоянная Больцмана.

Основное уравнение молекулярно-кинетической теории газов

Давление газа с точки зрения молекулярно-кинетической теории. Физический смысл абсолютной температуры. Средняя квадратичная скорость. Число степеней свободы. Поступательные, вращательные степени свободы молекул. Закон равномерного распределения энергии по степеням свободы.

Статистические распределения

Элементарные сведения из теории вероятностей. Понятие о функции распределения. Закон Максвелла распределения молекул по скоростям.

I начало термодинамики

Внутренняя энергия системы. Работа газа при изменении его объема. Графическое изображение работы. Теплота. Теплоемкость. I закон термодинамики. Невозможность создания вечного двигателя 1-го рода. Применение I начала термодинамики к изопроцессам идеального газа.

II начало термодинамики

Обратимые и необратимые процессы. Круговые процессы. Принципы действия тепловых двигателей. Цикл Карно и его КПД. Независимость КПД цикла Карно от природы рабочего тела. II начало термодинамики. Применение тепловых двигателей. Принципы работы холодильной машины. Энтропия. Закон возрастания энтропии.

Реальные газы

Отступление от законов идеальных газов. Межмолекулярные силы. Эффективный диаметр молекул. Уравнение Ван-дер-Ваальса. Изотермы газа Ван-дер-Ваальса. Непрерывность газообразного и жидкого состояния вещества. Фазовая диаграмма перехода жидкость – пар. Проблема сжижения газов.

Свойства жидкостей

Свойства жидкого состояния. Особенности теплового движения молекул в жидкостях. Поверхностное натяжение и его природа. Свободная энергия поверхности. Коэффициент поверхностного натяжения. Простые проявления поверхностного натяжения. Поверхностно-активные вещества. Смачивание. Силы, возникающие на кривой поверхности жидкости. Формула Лапласа. Капиллярные явления.

Твердые тела

Строение кристаллов. Внутрикристаллические силы. Пространственная решетка. Классификация кристаллов. Тепловые свойства кристаллов. Аморфные тела.

Список литературы

1. Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Высшая школа, 2005, 2007, 557с.
2. Дмитриева В.Ф. Основы физики. М.: Высшая школа, 2003, 527с.
3. Дмитриева В.Ф. Физика. М.: Издательский центр «Академия», 2006, 461 с.
4. Сивухин Д.В. Общий курс физики. М.: Физматлит, 2005, 552 с.
5. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. М.: Высш. шк., 2002, 718 с.

Примечание: в учебниках разных авторов возможны различия в буквенных обозначениях физических величин. В пособии обозначения преимущественно согласуются с учебником Трофимовой Т.И.

I. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КЛАССИЧЕСКОЙ МЕХАНИКИ
I.1. КИНЕМАТИКА ПОСТУПАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ

Основные понятия

I.1.1. Механическое движение - изменение с течением времени взаимного расположения тел или их частей.

I.1.2. Кинематика - раздел физики, изучающий движение, не рассматривая причины, которые это движение обуславливают.

I.1.3. Материальная точка - тело, обладающее массой, размерами которого в данных условиях можно пренебречь (размеры и форма которого не существенны в рассматриваемых условиях).

I.1.4. Поступательное движение – движение, при котором любая прямая, жестко связанная с движущимся телом, остаётся параллельной своему первоначальному положению.

I.1.5. Система отсчета - совокупность системы координат и часов:

$x = x(t), y = y(t), z = z(t).$

I.1.6. Траектория - линия, описываемая в пространстве движущейся точкой.

I.1.7. Путь (длина пути) (S)– длина участка траектории, пройденного материальной точкой в заданный интервал времени:

$$S = S(t). \qquad (1.1)$$

I.1.8. Мгновенная (линейная) скорость $(\vec{v})$ характеризует быстроту движения (путь, пройденный в единицу времени), направлена по касательной к траектории в сторону движения. Модуль мгновенной скорости равен первой производной пути по времени:

$$v = \frac{dS}{dt}. \qquad (1.2)$$

I.1.9. Средняя скорость неравномерного движения – скалярная величина, равная отношению длины пути S к продолжительности промежутка времени движения t:

$$\langle v \rangle = \frac{S}{t}. \qquad (1.3)$$

I.1.10. Тангенциальное ускорение $(\vec{a}_\tau)$ характеризует быстроту изменения численного значения скорости и равно первой производной скорости по времени:

$$a_\tau = \frac{dv}{dt}. \qquad (1.4)$$

Вектор $\vec{a}_\tau$ направлен по касательной к траектории движения.

I.1.11. Нормальное ускорение $(\vec{a}_n)$ определяет быстроту изменения направления скорости и определяется по формуле:

$$a_n = \frac{v^2}{R}, \tag{1.5}$$

где R – радиус кривизны траектории.

Вектор $\vec{a}_n$ направлен перпендикулярно вектору $\vec{\upsilon}$ к центру кривизны траектории.

I.1.12. Полное ускорение $(\vec{a})$ - геометрическая сумма тангенциальной и нормальной составляющих:

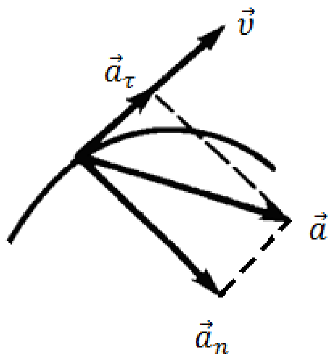


Рис. 1

$$\vec{a} = \vec{a}_\tau + \vec{a}_n. \tag{1.6}$$

Основные законы

I.1.13. Кинематическое уравнение поступательного движения материальной точки – формула, описывающая зависимость координат или пути от времени:

$x = x(t), y = y(t), z = z(t)$ или $S = S(t)$.

Частный случай – равнопеременное прямолинейное движение $(a_\tau = a = const,\ a_n = 0)$.

$$S = v_0 t \pm \frac{at^2}{2}, \tag{1.7}$$

где v_0 - начальная скорость.

Знак “+” соответствует ускоренному движению $(\vec{a} \uparrow\uparrow \vec{v})$.

Знак “-” соответствует замедленному движению $(\vec{a} \uparrow\downarrow \vec{v})$.

I.2. КИНЕМАТИКА ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ

Основные понятия

I.2.1. Абсолютно твердое тело – тело, расстояние между любыми двумя точками которого остаётся постоянным (не деформируется).

I.2.2. Вращательное движение – движение, при котором все точки тела движутся по окружностям, центры которых лежат на одной прямой, называемой осью вращения.

I.2.3. Угловое перемещение (φ) – угол поворота радиус-вектора точки.

I.2.4. Угловая скорость $(\vec{\omega})$ – векторная величина, характеризующая быстроту вращения (угол поворота радиус-вектора точки за единицу времени). Модуль вектора угловой скорости равен первой производной угла поворота по времени:

$$\omega = \frac{d\varphi}{dt}. \qquad (2.1)$$

$\vec{\omega}$ является псевдовектором, направленным по оси вращения; его направление совпадает с направлением поступательного движения острия винта, головка которого вращается в направлении движения точки по окружности (правило правового винта).

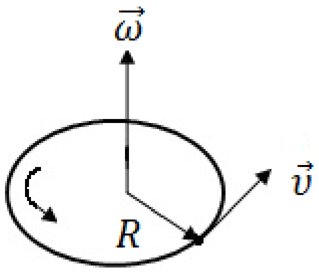


Рис. 2

I.2.5. Угловое ускорение $(\vec{\varepsilon})$ характеризует быстроту изменения угловой скорости, определяется первой производной угловой скорости по времени:

$$\varepsilon = \frac{d\omega}{dt}. \qquad (2.2)$$

При ускоренном движении вектор $\vec{\varepsilon}$ сонаправлен вектору $\vec{\omega}$, при замедленном – противоположен ему.

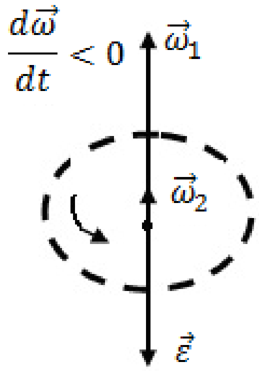


Рис. 3

Основные законы

I.2.6. Кинематическое уравнение вращательного движения – формула, описывающая зависимость углового перемещения от времени:

$$\varphi = \varphi(t).$$

Частный случай: равнопеременное движение точки по окружности ($\varepsilon = const$)

$$\varphi = \omega_0 t \pm \frac{\varepsilon t^2}{2}, \qquad (2.3)$$

где ω_0 – начальная угловая скорость,

"+" соответствует ускоренному движению ($\vec{\varepsilon} \uparrow\uparrow \vec{\omega}$),

"-" соответствует замедленному движению ($\vec{\varepsilon} \uparrow\downarrow \vec{\omega}$).

Пример 1: Точка движется по окружности радиусом 4 м. Зависимость пройденного точкой пути от времени описывается уравнением $S = 2t + t^2$. Определить $\vec{v}, \vec{a}_n, \vec{a}, \vec{\omega}$ в момент времени $t = 1$ с. Указать на рисунке их направление.

Дано:

$R = 4$ м

$S = 2t + t^2$, м

$t = 1$ с

$\vec{v}, \vec{a}_n, \vec{a}, \vec{\omega}$–?

Решение.

Линейная скорость точки $v = \frac{dS}{dt}$. (1)

$$v = \frac{d}{dt}(2t + t^2) = 2 + 2t,$$

$$v = 2 + 2 \cdot 1 = 4\left(\frac{\text{м}}{c}\right).$$

Вектор $\vec{v}$ – направлен по касательной к траектории.

Нормальное ускорение $a_n = \frac{v^2}{R}$ (2)

$$a_n = \frac{16}{4} = 4(\text{м/с}^2).$$

Вектор $\vec{a}_n$ направлен к центру кривизны.

Полное ускорение $\vec{a} = \vec{a}_n + \vec{a}_\tau$, (3)

где $\vec{a}_\tau$ – тангенциальное ускорение,

$a_\tau = \frac{dv}{dt}$, $a_\tau = \frac{d}{dt}(2 + 2t)$, $a_\tau = 2$ (м/c^2);

$a_\tau > 0$, т.е. $\vec{a}_\tau \uparrow\uparrow \vec{v}$, $\vec{a}_\tau \perp \vec{a}_n$.

Из (3) полное ускорение определяется как диагональ параллелограмма, построенного на $\vec{a}_\tau$ и $\vec{a}_n$ как на сторонах. Угол между a_τ и a_n равен 90^0, т.е. по теореме Пифагора $a^2 = {a^2}_\tau + {a^2}_n$, или $a = \sqrt{{a^2}_\tau + {a^2}_n}$,

$$a = \sqrt{4 + 16} = \sqrt{20} = 4{,}47 \ (\text{м/с}^2).$$

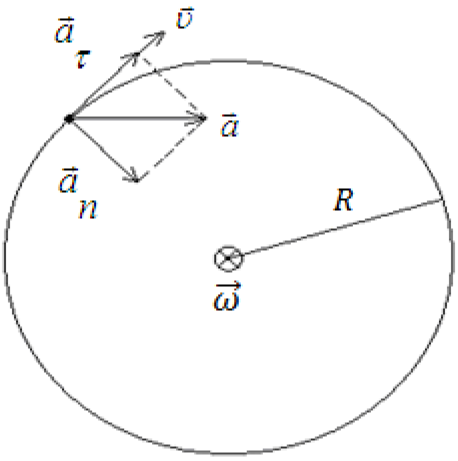
Угловая скорость $$\omega = \frac{d\varphi}{dt},\qquad (4)$$

где φ – угол поворота радиус-вектора точки. S – длина дуги окружности:

$$S = \varphi \cdot R \ \to \varphi = \frac{S}{R}. \qquad (5)$$

Из (4) и (5) $\omega = \frac{1}{R} \cdot \frac{dS}{dt} = \frac{\upsilon}{R}$; $\omega = \frac{4}{4} = 1$ (рад/с).

Если скорость $\vec{\upsilon}$ направлена по часовой стрелке, то $\vec{\omega}$ направлен вдоль оси вращения "от нас" (правило правого винта).



<u>Приложение:</u>

1) производная $\frac{d(x^n)}{dx} = n \cdot x^{n-1}$ – см. "Приложение" №15,
2) сложение векторов – см. "Приложение" №11,
3) теорема Пифагора – см. "Приложение" №12,
4) длина дуги - см. "Приложение" №19.

I.3. ДИНАМИКА ПОСТУПАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ

Основные понятия

I.3.1. <u>Динамика</u> – раздел физики, изучающий движение тел и причины, которые вызывают или изменяют это движение.

I.3.2. <u>Масса</u> (m) – скалярная величина, являющаяся мерой инертности тел в поступательном движении. (Инертность – свойство тела сохранять состояние покоя или равномерного прямолинейного движения в случае отсутствия внешних воздействий).

I.3.3. <u>Сила</u> – векторная величина, являющаяся мерой механического воздействия на материальную точку или тело со стороны других тел. Сила полностью задана, если указаны её численное значение, направление и точка приложения.

a)Сила тяготения (гравитационная сила) ($\vec{F}_{\text{тяг}}$) - сила притяжения между телами, направлена вдоль прямой, проходящей через взаимодействующие тела. Модуль $F_{\text{тяг}}$ определяется по *закону всемирного тяготения*: между любыми двумя материальными точками действует сила взаимного притяжения, прямо пропорциональная произведению масс этих точек (m_1 и m_2) и обратно пропорциональная квадрату расстояния между ними (r^2):

$$F_{\text{тяг}} = G\frac{m_1\, m_2}{r^2}, \tag{3.1}$$

где G – гравитационная постоянная.

b)Частный случай – сила тяжести ($\vec{F}_{\text{тяж}}$) – сила, с которой Земля притягивает тела, находящиеся вблизи её поверхности. $\vec{F}_{\text{тяж}}$ направлена вертикально вниз. Если пренебречь суточным вращением Земли вокруг своей оси, то сила тяжести

$$F_{\text{тяж}} = G\frac{M\, m}{R^2}, \tag{3.2}$$

где M – масса Земли, R – радиус Земли, m – масса тела.

$$G\frac{M}{R^2} = g \text{ - ускорение свободного падения.} \tag{3.3}$$

Из (3.2) и (3.3)

$$F_{\text{тяж}} = mg. \tag{3.4}$$

c)Сила реакции опоры ($\vec{N}$) – сила, действующая на тело со стороны опоры перпендикулярно поверхности.

d)Сила трения скольжения $\left(\vec{F}_{\text{тр}}\right)$ – сила, препятствующая скольжению соприкасающихся тел; определяется по закону Амонтона:

$$F_{\text{тр}} = f \cdot F_H = f \cdot N, \tag{3.5}$$

где f – коэффициент трения скольжения, зависит от материала и качества обработки соприкасающихся поверхностей тел; F_H – сила нормального давления – сила, прижимающая тело к опоре; $\vec{F}_{\text{тр}}$ направлена вдоль поверхности соприкосновения противоположно движению.

e)Сила упругости $\left(\vec{F}_{\text{упр}}\right)$ – сила, препятствующая изменению положения частей тела вследствие упругой деформации. Сила упругости при упругой деформации пропорциональна деформации (закон Гука):

$$F_{x\ \text{упр}} = -k \cdot \Delta x, \tag{3.6}$$

где $F_{x\ \text{упр}}$– проекция силы упругости на ось x ; k – коэффициент упругости (для пружины – жесткость), Δx – абсолютная деформация.

Знак “–” указывает на то, что $F_{x\,упр}$ направлена в сторону, противоположную деформации Δx.

f) Сила натяжения (T) – сила, действующая на тело со стороны подвеса; направлена к точке подвеса.

I.3.4. Замкнутая (изолированная) механическая система – совокупность взаимодействующих тел, на которые не действуют внешние тела.

I.3.5. Импульс (количество движения) ($\vec{p}$) – величина, характеризующая состояние движения тела в зависимости от его массы. Импульс – векторная величина, действующая в направлении скорости:

$$\vec{p} = m\vec{v}. \tag{3.7}$$

I.3.6. Энергия – универсальная мера различных форм движения и взаимодействия (характеризует способность тела совершать работу).

I.3.7. Кинетическая энергия (T) – энергия, которой обладает тело вследствие механического движения. При поступательном движении тело массой m, движущееся со скоростью v, обладает кинетической энергией:

$$T = \frac{mv^2}{2}. \tag{3.8}$$

I.3.8. Потенциальная энергия (Π) – механическая энергия взаимодействия, определяемая взаимным расположением тел или частей одного и того же тела.

a) Потенциальная энергия тела, находящегося на высоте h относительно поверхности Земли:

$$\Pi_{тяж} = mgh. \tag{3.9}$$

b) Потенциальная энергия упругодеформированного тела:

$$\Pi_{упр} = \frac{k(\Delta x)^2}{2}. \tag{3.10}$$

Примечание: потенциальная энергия, определяемая по формуле (3.9) не является полной потенциальной энергией тела, а представляет собой лишь приращение потенциальной энергии при подъёме тела на высоту h над поверхностью Земли, принятой за нулевой уровень.

Формула (1.19) верна при условии, что ускорение свободного падения g практически постоянно на всей высоте подъёма.

I.3.9. Полная механическая энергия системы (E)– суммарная энергия механического движения и взаимодействия всех тел, входящих в эту систему:

$$E = T + \Pi. \tag{3.11}$$

I.3.10. Работа (A) – мера обмена энергией между взаимодействующими телами:

$$A = \Delta\Pi + \Delta T, \tag{3.12}$$

где $\Delta\Pi$ - изменение потенциальной энергии; ΔT - изменение кинетической энергии.

Частный случай:

а) Если сила $\vec{F} = const$, то работа силы – скалярная величина, равная

$$A = FS\cos\alpha = F_S \cdot S, \tag{3.13}$$

где α - угол между векторами $\vec{F}$ и $\vec{v}$, не изменяющийся в процессе движения; F_S – проекция $\vec{F}$ на направление движения.

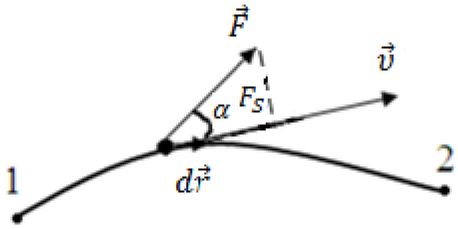


Рис. 4

б) Если $\vec{F} \neq const$, то работа на конечном участке пути от точки 1 до точки 2 равна:

$$A = \int_1^2 F_S\, dS, \tag{3.14}$$

где F_S – составляющая силы, совпадающая с направлением движения.

Работа – величина алгебраическая: она может быть положительной ($\cos\alpha > 0$) и отрицательной ($\cos\alpha < 0$).

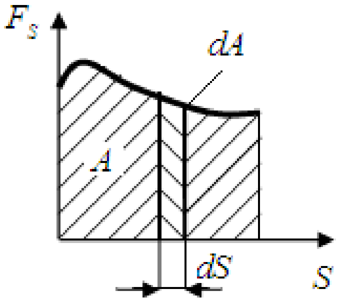


Рис. 5

I.3.11. Потенциальное поле – силовое поле (гравитационное поле, поле упругих сил), характеризующееся тем, что работа, совершаемая силами при перемещении, не зависит от формы траектории (определяется только начальным и конечным положением тела).

I.3.12. Консервативная сила – сила, действующая в потенциальном поле ($F_{тяг}$, $F_{тяж}$, $F_{упр}$).

I.3.13. Диссипативная сила – сила, работа которой зависит от траектории перемещения тела из одной точки в другую $(F_{тр})$.

Основные законы

I.3.14. Первый закон Ньютона: всякая материальная точка (тело) сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения до тех пор, пока воздействие со стороны других тел не заставит её изменить это состояние: т.е. $\vec{v} = const$ при

$$\sum_{i=1}^{n} \vec{F}_i = 0. \quad (3.15)$$

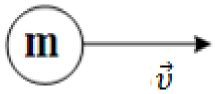


Рис. 6

I.3.15. Второй закон Ньютона: ускорение, приобретаемое материальной точкой (телом), пропорционально вызывающей его силе, совпадает с ней по направлению и обратно пропорционально массе материальной точки (тела):

$$\vec{a} = \kappa \frac{\vec{F}}{m}. \quad (3.16)$$

В случае действия нескольких сил:

$$\vec{F} = \sum_{i=1}^{n} \vec{F}_i. \quad (3.17)$$

В СИ коэффициент пропорциональности κ=1, т.е. из (3.16) и (3.17)

$$\vec{a} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \vec{F}_i}{m}. \quad (3.18)$$

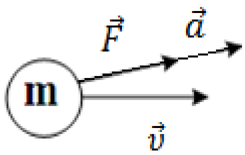


Рис. 7

I.3.16. Третий закон Ньютона: всякое действие носит характер взаимодействия: силы, с которыми действуют друг на друга материальные точки (тела), всегда равны по модулю, противоположно направлены и действуют вдоль прямой, соединяющей эти точки:

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}. \quad (3.19)$$

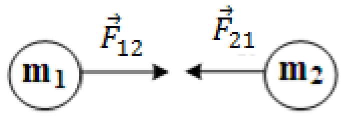
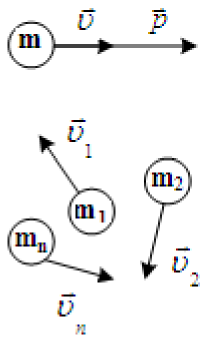


Рис. 8

I.3.17. Закон сохранения импульса: полный импульс замкнутой механической системы остаётся постоянным:

$$\vec{p} = const. \tag{3.20}$$



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

$$\vec{p} = \sum_{i=1}^{n} \vec{p}_i.$$

$$(\vec{p} = m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 + \dots + m_n\vec{v}_n)$$

Рис. 9

Примечание: если система тел не замкнута, но сумма проекций всех внешних сил на какую-либо ось равна нулю, то закон сохранения импульса выполняется в проекции на эту ось:

$$\sum_{i=1}^{n} p_x = const. \tag{3.21}$$

I.3.18. Закон сохранения механической энергии: в замкнутой системе тел, между которыми действуют только консервативные силы, полная механическая энергия сохраняется: $E = const$,

где E – полная механическая энергия $(E = T + \Pi)$. (3.22)

Пример 2. По наклонной плоскости с углом при основании 30^0 соскальзывает тело. Определить ускорение движения, если коэффициент трения f = 0,1.

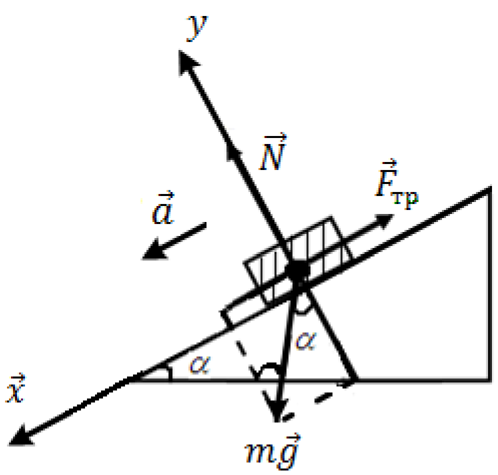
Дано:

$\alpha = 30°$

$f = 0.1$

$\vec{a}$–?

Решение:



Со стороны Земли на тело действует сила тяжести $m\vec{g}$, направленная вертикально вниз. Со стороны опоры действует сила реакции опоры $\vec{N}$, направленная перпендикулярно опоре. Со стороны поверхности действует сила трения $\vec{F}_{тр} \uparrow\downarrow \vec{v}$. По 2-ому закону Ньютона $\vec{a} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \vec{F}_i}{m}$, т.е. $\vec{a} = \frac{m\vec{g}+\vec{N}+\vec{F}_{тр}}{m} \rightarrow m\vec{a} = m\vec{g} + \vec{N} + \vec{F}_{тр}$. Запишем это уравнение в скалярной форме. Для этого найдем проекции входящих в него векторов на оси *ox* и *oy*:

$$ox: ma = mg \cdot \sin\alpha - F_{тр}, \tag{1}$$

$$oy: 0 = -mg \cdot \cos\alpha + N. \tag{2}$$

Сила трения $F_{тр} = f \cdot N$, с учётом (2) $\quad F_{тр} = f \cdot mg \cdot \cos\alpha.$ (3)

Из (1) с учётом (3) $a = \frac{mg \cdot \sin\alpha - f \cdot mg \cdot \cos\alpha}{m} = g(\sin\alpha - f\ \cos\alpha)$

$g = 9{,}8$ м/с^2(табл.). Произведём вычисления:

$a = 9{,}8 \cdot (0{,}5 - 0{,}1 \cdot 0{,}87) = 4{,}05$ (м/с^2).

Приложение:

1) тригонометрические функции – см. “Приложение” №9,

2) проекция вектора – см. “Приложение” №10,

3) признак равенства углов – см. “Приложение” №19,

4) $\sin 30° = 0{,}5$; $\cos 30° \approx 0{,}87$ – см. “Приложение” №9.

Пример 3: Пластилиновый шар массой m_1 скатывается по желобу, наклоненному под углом 30^0, и сталкивается с шаром массой m_2, лежащим на столе. Определить общую скорость движения шаров после удара и вычислить работу, совершаемую при деформации шаров. Скорость первого шара перед ударом равна $\upsilon_1 = 2$ м/с. $m_1 = 25$ г, $m_2 = 20$ г.

Дано:

$m_1 = 25$ г $= 25 \cdot 10^{-3}$ кг

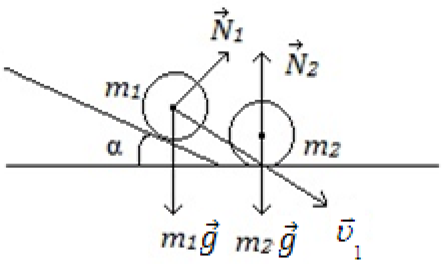
$m_2 = 20$ г $= 20 \cdot 10^{-3}$ кг

$\alpha = 30°$

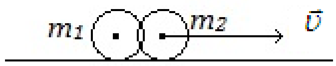
$\upsilon_1 = 2$ м/с

$\vec{\upsilon}, A$—?

Решение:



До удара



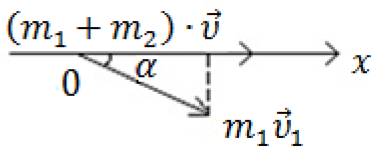
После удара

Шары можно рассматривать как систему двух неупруго взаимодействующих тел. Эта система не замкнута, т.к. на неё действуют опора и Земля, т.е. внешние силы $\vec{N}$ и $m\vec{g}$. Но, поскольку время взаимодействия мало (удар), эти силы не изменяют характер движения, т.е. систему можно считать замкнутой на момент удара. По закону сохранения импульса

$$\sum_{i=1}^{n} \vec{p}_i = const,$$

т.е. $$m_1\vec{\upsilon}_1 + m_2\vec{\upsilon}_2 = m_1\vec{\upsilon}_1{}' + m_2\vec{\upsilon}_2{}', \qquad (1)$$

где $\vec{\upsilon}_1$ и $\vec{\upsilon}_2$ – скорости шаров до удара, $\vec{\upsilon}_1{}'$ и $\vec{\upsilon}_2{}'$ - скорости шаров после удара. Удар неупругий, т.е. шары становятся одним телом: $\upsilon_1{}' = \upsilon_2{}' = \upsilon$.



Из (1) в проекции на ось x:

$$m_1 v_1 \cos\alpha = (m_1 + m_2) \cdot v, \tag{2}$$

из (2)

$$v = \frac{m_1 v_1 \cos\alpha}{m_1 + m_2}. \tag{3}$$

Произведем вычисления:

$$v = \frac{25 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot \cos 30°}{(25+20) \cdot 10^{-3}} = 0{,}97 \text{ (м/с)}.$$

Работа, затраченная на деформацию шаров, равна разности энергии до и после удара:

$$A = \Delta E, \tag{4}$$

где $E = \Pi + T$ – полная механическая энергия.

Поскольку потенциальная энергия в поле силы тяжести ($\Pi = mgh$) не изменяется до и после удара, то из (4)

$$A = \Delta T = T_2 - T_1, \tag{5}$$

где

$$T_1 = \frac{m_1 \, {v_1}^2}{2}, \tag{6}$$

$$T_2 = \frac{(m_1 + m_2) \, v^2}{2}. \tag{7}$$

Используя (5)-(7), произведём вычисления:

$$A = \frac{45 \cdot 10^{-3} \cdot (0{,}97)^2}{2} - \frac{25 \cdot 10^{-3} \cdot 4}{2} = -28{,}83 \cdot 10^{-3} \text{ (Дж)} = -28{,}83 \text{ (мДж)}.$$

Приложение:

1) проекция вектора – см. “Приложение” №10,

2) $\cos\alpha$ – см. “Приложение” №9.

Пример 4: При выстреле из пружинного пистолета вертикально вверх пуля массой m движется со скоростью v на высоте h. Определить жесткость пружины пистолета, если перед выстрелом она была сжата на Δx.

Дано:	Решение:
$m, v, h, \Delta x$	Система пружина – пуля может считаться замкнутой, если пренебречь силами трения, сопротивления. В этом случае на тела системы действуют только консервативные силы: $F_{тяж}$ и $F_{упр}$, т.е. можно применить закон сохранения механической энергии $E = const$, или
$k-?$	

$$E_1 = E_2\,, \qquad (\text{где } E = \Pi + \mathrm{T}). \tag{1}$$

Если пренебречь массой пружины, то из (1)

$$\Pi_1 + \mathrm{T}_1 = \Pi_2 + \mathrm{T}_2, \tag{2}$$

где $\Pi_1, \Pi_2, \mathrm{T}_1, \mathrm{T}_2$ – потенциальные и кинетические энергии системы в начальном и конечном состояниях. $T_1 = 0$ (система неподвижна), а

$$T_2 = \frac{mv^2}{2}. \tag{3}$$

Из (2)
$$\Pi_1 = \Pi_2 + \mathrm{T}_2. \tag{4}$$

Примем за нулевой уровень положение пули в стволе до выстрела ($h_0 = 0$), тогда потенциальная энергия системы в начальном состоянии будет равна потенциальной энергии сжатой пружины ($\Pi_{1тяж} = mgh_0 = 0$):

$$\Pi_{1упр} = \frac{1}{2}k\,(\Delta x)^2, \tag{5}$$

а в конечном состоянии – потенциальной энергии пули на высоте h, т.е.

$$\Pi_{2тяж} = mgh, \qquad \left(\Pi_{2упр} = 0, \text{т. к. } \Delta x = 0\right). \tag{6}$$

g- ускорение свободного падения (табл.).

Из (3), (4), (5) и (6):

$$\frac{1}{2}k(\Delta x)^2 = mgh + \frac{mv^2}{2} = \frac{2mgh + mv^2}{2} = \frac{m(2gh + v^2)}{2},$$

откуда
$$k = \frac{m(2gh + v^2)}{(\Delta x)^2}.$$
- Рабочая формула

I.4. ДИНАМИКА ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ

Основные понятия

I.4.1. <u>Момент инерции тела</u> (J) относительно оси – мера инертности во вращательном движении относительно этой оси определяется как сумма произведений масс N материальных точек системы на квадраты их расстояний до оси вращения:

$$J = \sum_{i=1}^{n} m_i r_i^2. \tag{4.1}$$

В случае непрерывного распределения масс эта сумма сводится к интегралу по объёму тела:

$$J = \int_V r^2 \, dm. \tag{4.2}$$

Для тел правильной геометрической формы после интегрирования получены формулы:

сплошной цилиндр (диск):

$$J_z = \frac{1}{2} m R^2, \tag{4.3}$$

обруч (тонкостенный цилиндр):

$$J_z = m R^2, \tag{4.4}$$

где J_z - момент инерции тела массой m относительно оси z, проходящей через центр масс, R - радиус тела.

I.4.2. <u>Момент силы</u> ($\vec{M}$) – причина вращательного движения и изменения его характера; физическая величина, определяемая векторным произведением радиус-вектора $\vec{r}$ на силу $\vec{F}$:

$$\vec{M} = [\vec{r} \cdot \vec{F}]. \tag{4.5}$$

Модуль момента силы:

$$M = F \cdot r \cdot \sin \alpha = F \cdot l, \tag{4.6}$$

Где α - угол между направлением $\vec{r}$ и $\vec{F}$, l – плечо силы – кратчайшее расстояние между линией действия силы и точкой O.

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

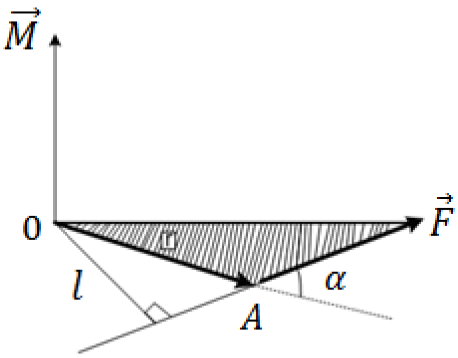


Рис. 10

I.4.3. Момент импульса – величина, характеризующая состояние движения вращающегося тела с учетом момента инерции. Момент импульса – векторная величина. Для неподвижных осей направление момента совпадает с направлением угловой скорости $\vec{\omega}$.

$$\vec{L} = J \cdot \vec{\omega}, \tag{4.7}$$

где J - момент инерции тела относительно оси z.

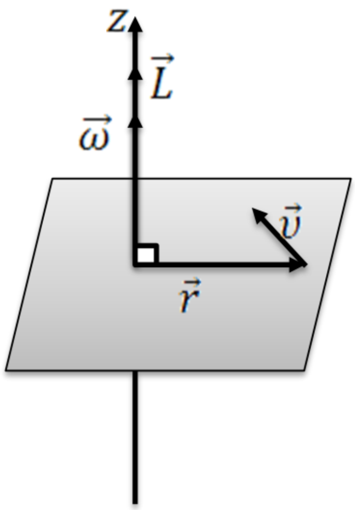


Рис. 11

I.4.4. Кинетическая энергия вращательного движения:

$$T_{\text{вр}} = \frac{J_z \cdot \omega^2}{2}. \tag{4.8}$$

Основные законы

I.4.5. Основное уравнение динамики вращательного движения твёрдого тела относительно неподвижной оси z:

$$\varepsilon_z = \frac{M_z}{J_z}, \tag{4.9}$$

где M_z – алгебраическая сумма проекций моментов сил на ось z, J_z– момент инерции тела относительно оси z, ε_z– угловое ускорение (проекция на ось z).

Если ось z проходит через центр масс тела, то имеет место векторное равенство:

$$\vec{M} = J \cdot \vec{\varepsilon}\,. \tag{4.10}$$

I.4.6. Закон сохранения момента импульса: момент импульса замкнутой системы сохраняется:

$$\vec{L} = const \qquad (\vec{L} = \sum_{i=1}^{n} \vec{L}_i) \tag{4.11}$$

Пример 5. Через блок в виде сплошного диска, имеющего массу 80 г и радиус 10 см, перекинута тонкая нить, к которой приложены силы T_1= 0,7 Н и T_2=1,4 Н. Определить угловое ускорение блока.

Дано:

$m = 80$ г $= 80 \cdot 10^{-3}$ кг
$r = 10$ см $= 0{,}1$ м
T_1= 0,7 Н
T_2=1,4 Н

$\vec{\varepsilon}$–?

Решение:

Диск взаимодействует с Землей, нитью и осью. Если силы трения малы, то вращение блока происходит под действием сил $\vec{T}_1, \vec{T}_2, m\vec{g}$ и $\vec{N}$. Основное уравнение динамики вращательного движения:

$$\varepsilon = \frac{\sum_{i=1}^{n} M_i}{J}, \tag{1}$$

где ε – угловое ускорение, M_i – проекция на ось z (направлена “на нас”) моментов всех действующих на блок сил, J – момент инерции блока.

$M = F \cdot l$, где l – плечо силы. Из рисунка видно, что для сил T_1 и T_2 $l = r$. Направление момента силы определяется по правилу правого винта, т.е. $M_1 = T_1 \cdot r,$ (2)

$\vec{M}_1$ направлен “от нас” ($M_1 < 0$).

$$M_2 = T_2 \cdot r. \tag{3}$$

$\vec{M}_2$ направлен “на нас” ($M_2 > 0$). Моменты сил $m\vec{g}$ и $\vec{N}$ равны нулю, т.к. плечо этих сил равно нулю.

Из (1), (2) и (3)

$$\varepsilon = \frac{-T_1 r + T_2 r}{J} = \frac{(T_2 - T_1) \cdot r}{J}. \tag{4}$$

Момент инерции сплошного диска

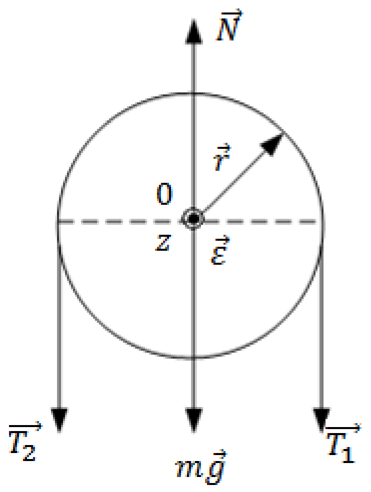
$$J = \frac{1}{2}mr^2. \tag{5}$$

Из (4), (5) $\quad \varepsilon = \frac{2(T_2 - T_1)r}{mr^2} = \frac{2(T_2 - T_1)}{mr}.$

Произведем вычисления:

$\varepsilon = \frac{2(1{,}4 - 0{,}7)}{80 \cdot 10^{-3} \cdot 0{,}1} = 175$ (рад/с^2).

Положительное значение углового ускорения означает, что вектор $\vec{\varepsilon}$ направлен «на нас», т.е. вращение блока происходит против часовой стрелки ускоренно.



Приложение: проекция вектора – см. “Приложение” №10.

II. ОСНОВЫ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ФИЗИКИ И ТЕРМОДИНАМИКИ.

Основные понятия

II.1. Молекулярная физика – раздел физики, изучающий свойства вещества на основе молекулярно-кинетической теории: все тела состоят из молекул, находящихся в непрерывном хаотическом движении.

II.2. Термодинамика – раздел физики, изучающий общие свойства макроскопических систем, находящихся в состоянии термодинамического равновесия, и процессы перехода между этими состояниями.

II.3. Термодинамические параметры (параметры состояния) – основные характеристики свойств термодинамической системы:

a) <u>Температура</u> (T) – скалярная величина, характеризующая состояние термодинамического равновесия макроскопической системы и определяющая теплообмен между телами; она является мерой средней кинетической энергии теплового движения молекул.

Термодинамическая температура (температура по шкале Кельвина):

$$T, K \approx 273 + t°\mathrm{C}, \tag{5.1}$$

где $t°\mathrm{C}$ – температура в градусах Цельсия.

b) <u>Давление</u> (p)– сила, действующая перпендикулярно поверхности на единицу её площади:

$$p = \frac{F_n}{S}, \tag{5.2}$$

где F_n - проекция силы на направление нормали.

c) Объём (V) – объем сосуда, занимаемого газом.

II.4. <u>Идеальный газ</u> – идеализированная модель, согласно которой:

a) собственный объём молекул газа пренебрежимо мал по сравнению с объёмом сосуда;

b) между молекулами газа отсутствуют силы взаимодействия;

c) столкновения молекул газа между собой и со стенками сосуда абсолютно упругие.

II.5. <u>Степени свободы</u> (i) – независимые координаты, полностью определяющие положение молекулы в пространстве по отношению к системе отсчета. Для одноатомного газа имеет смысл говорить только о поступательных степенях свободы x, y, z, т.е.

$$i = i_{\text{пост}} = 3. \tag{5.3}$$

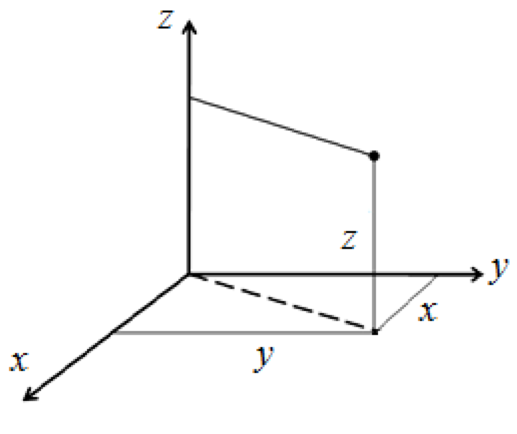


Рис. 12

Двухатомная или любая линейная молекула кроме трех степеней свободы поступательного движения имеет ещё две степени свободы вращательного движения ($i_{\text{вр}}$). Таким образом, полное число степеней свободы

$$i = i_{\text{пост}} + i_{\text{вр}} = 5. \tag{5.4}$$

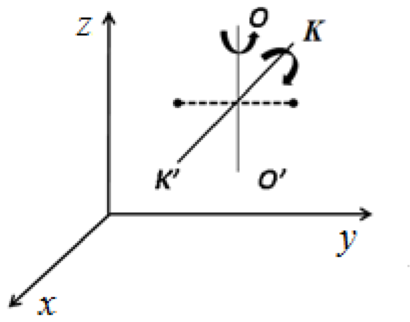


Рис. 13

Трехатомная и многоатомная нелинейные молекулы имеют шесть степеней свободы: три поступательные и три вращательные, т.е. $i = 6$.

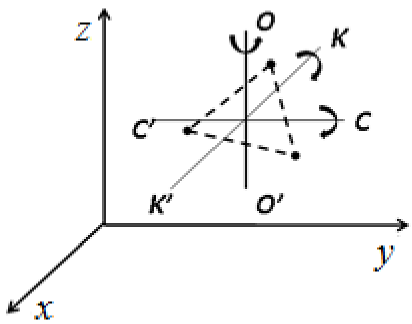


Рис. 14

II.6. Средняя кинетическая энергия молекулы ($\langle\varepsilon\rangle$)

$$\langle\varepsilon\rangle = \frac{E}{N},$$

где E – сумма кинетических энергий молекул газа, N – число молекул.

II.7. Внутренняя энергия идеального газа (U) – суммарная кинетическая энергия всех его молекул:

$$U = N\langle\varepsilon\rangle, \tag{5.5}$$

где N – число молекул газа, $\langle\varepsilon\rangle$ – средняя кинетическая энергия молекулы.

II.8. Количество теплоты (теплота) (Q) – энергия, передаваемая системе внешними телами путём теплообмена (процесса обмена внутренними энергиями при контакте тел, имеющих разные температуры).

II.9. Работа газа A (при изменении его объёма):

$$A = \int_{V_1}^{V_2} p\, dV, \tag{5.6}$$

где V_1 и V_2- объём газа до и после совершения работы расширения.

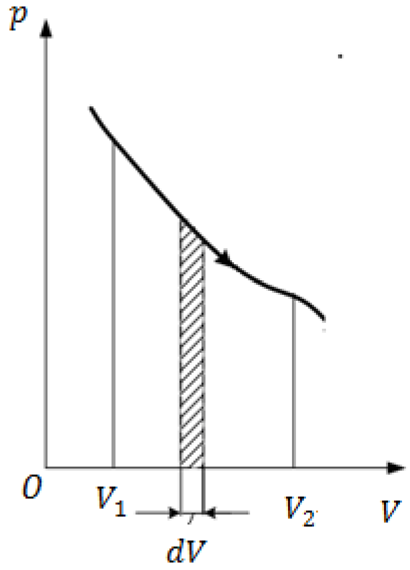


Рис. 15

При изохорном процессе ($V = const$) работа $A = 0$ (5.7)

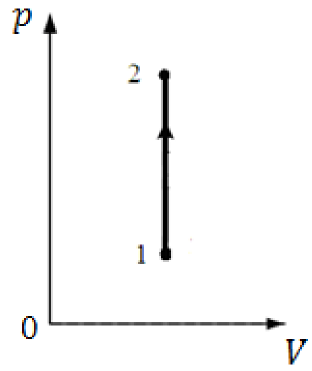


Рис. 16

При изобарном процессе ($p = const$) $A = p(V_2 - V_1)$ (5.8)

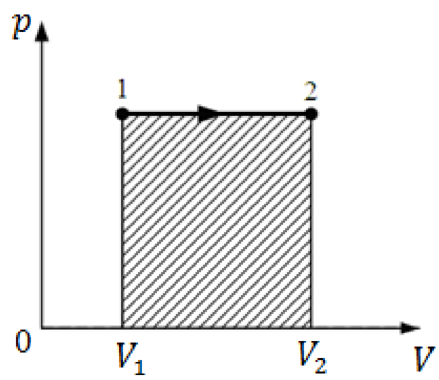


Рис. 17

При изотермическом процессе ($T = const$) $A = \dfrac{m}{\mu} RT \ln \dfrac{V_2}{V_1}$, (5.9) где μ - молярная масса газа, R – молярная газовая постоянная.

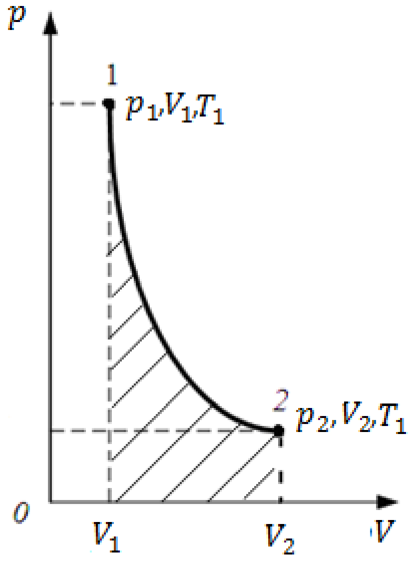


Рис. 18

II.10. Удельная теплоёмкость (c) – количество теплоты, необходимой для нагревания 1 кг вещества на 1 K:

$$c = \frac{Q}{m\,\Delta T}. \tag{5.10}$$

II.11. Молярная теплоёмкость (C) – количество теплоты, необходимой для нагревания 1 моль вещества на 1 К:

$$C = \frac{Q}{\nu\,\Delta T}, \tag{5.11}$$

где $\nu = \frac{N}{N_A}$ – количество молей (количество вещества), N – число молекул, N_A – число Авогадро.

Основные законы

II.12. Уравнение состояния идеального газа (Клапейрона-Менделеева):

$$pV = \frac{m}{\mu}RT = \nu RT, \tag{5.12}$$

где m – масса газа, μ – молярная масса (масса 1 моля), R – молярная газовая постоянная, ν – количество вещества.

II.13. Теорема Больцмана: для статистической системы, находящейся в состоянии термодинамического равновесия, на каждую степень свободы приходится в среднем одинаковая кинетическая энергия:

$$\langle\varepsilon\rangle = \frac{1}{2}kT; \tag{5.13}$$

где k – постоянная Больцмана.

Следствия:

a) средняя кинетическая энергия одной молекулы газа:

$$\langle \varepsilon_1 \rangle = \frac{i}{2} kT, \qquad (5.14)$$

b) внутренняя энергия газа:

$$U = \frac{i}{2} kTN_A \nu = \frac{i}{2} \nu RT. \qquad (5.15)$$

II.14. Первое начало термодинамики: теплота, сообщаемая системе (газу), расходуется на изменение её внутренней энергии и на совершение ею работы против внешних сил:

$$Q = \Delta U + A. \qquad (5.16)$$

Следствия:

a) Изохорный процесс: $A = 0, Q = \Delta U,$ т.е. молярная теплоемкость при постоянном объеме

$$C_V = \frac{i}{2} R\ . \qquad (5.17)$$

b) Изобарный процесс: $A = p \cdot \Delta V,\ Q = A + \Delta U$, т.е. молярная теплоемкость при постоянном давлении

$$C_P = \ \frac{i}{2}\ R + R. \qquad (5.18)$$

c) Изотермический процесс: $\Delta U = 0, Q = A.$

Пример 6: Двухатомный газ, находящийся в цилиндре под поршнем сечением S при постоянном давлении p, нагревают так, что поршень перемещается на расстояние l. Определить количество теплоты, полученное газом. Изобразить процесс графически.

Дано:	Решение:
S, p, l	Число степеней свободы молекулы газа i=5 (двухатомная молекула). Первое начало термодинамики: $Q = \Delta U + A$ (1).
$Q-?$	Для изобарного процесса ($p = const$)

$$A = p\Delta V = p(V_2 - V_1) = p \cdot l \cdot S\ . \qquad (2)$$

Изменение внутренней энергии:

$$\Delta U = U_2 - U_1 = \frac{i}{2}\frac{m}{\mu} R(T_2 - T_1) = \frac{i}{2}\frac{m}{\mu} R\ \Delta T. \qquad (3)$$

Из уравнения Менделеева-Клапейрона $pV = \frac{m}{\mu} RT$ для двух состояний газа:

$$p_1 V_1 = \frac{m}{\mu} RT_1; \tag{4}$$

$$p_2 V_2 = \frac{m}{\mu} RT_2. \tag{5}$$

При условии $p_1 = p_2 = p$ после вычитания из (5) уравнения (4):

$$p(V_2 - V_1) = \frac{m}{\mu} R(T_2 - T_1) \quad \text{или} \quad p\,\Delta V = \frac{m}{\mu} R\,\Delta T. \tag{6}$$

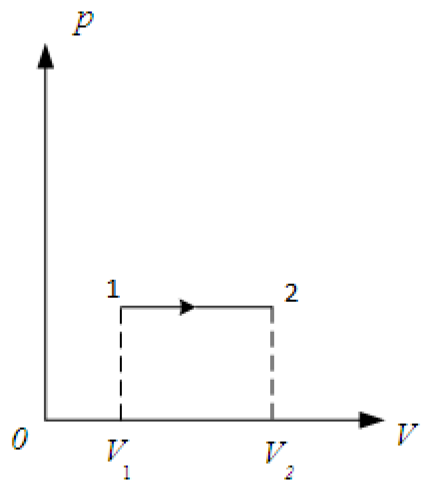
Из (3) и (6) $\qquad \Delta U = \frac{i}{2} p\,\Delta V.$ (7)

Следовательно, из (1), (2) и (7)

$$Q = \frac{i}{2} p\,\Delta V + p\,\Delta V = \frac{i+2}{2} p\,\Delta V = \frac{i+2}{2} p \cdot l \cdot S.$$

$$Q = \frac{i}{2} p \cdot l \cdot S.$$ – Рабочая формула.

График процесса:



Приложение: площадь прямоугольника – см. “Приложение” №19.

III. МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ

Основные понятия

III.1. Жидкость – состояние вещества, имеющего определённый объём, но не имеющего упругости формы. Жидкости отличаются сильным межмолекулярным взаимодействием и, вследствие этого, малой сжимаемостью.

III.2. Силы поверхностного натяжения – силы, сокращающие площадь поверхности жидкости.

III.3. Поверхностное натяжение – явление, возникающее на границе раздела двух фаз: жидкость - газ, жидкость - твердое тело вследствие различного межмолекулярного взаимодействия в соприкасающихся фазах.

III.4. Поверхностная энергия – избыточная энергия частиц поверхностного слоя жидкости по сравнению с их энергией внутри объёма. Минимум свободной поверхностной энергии жидкости реализуется при минимальной площади поверхности (при заданном объёме), вследствие чего поверхность принимает форму сферы.

III.5. Коэффициент поверхностного натяжения (α) :

1)
$$\alpha = \frac{A}{S}, \qquad (6.1)$$

где A – работа изотермического образования свободной поверхности жидкости, S – площадь поверхности жидкости. Здесь коэффициент поверхностного натяжения численно равен работе, необходимой для образования единицы площади поверхностного слоя жидкости при постоянной температуре.

2)
$$\alpha = \frac{\Delta E}{\Delta S}, \qquad (6.2)$$

где ΔE – изменение свободной поверхностной энергии, ΔS – изменение площади поверхностного слоя.

3) если поверхность жидкости ограничена периметром смачивания, то

$$\alpha = \frac{F_{\text{жид}}}{l}, \qquad (6.3)$$

где $F_{\text{жид}}$ – сила поверхностного натяжения, l – длина периметра смачивания.

Коэффициент поверхностного натяжения численно равен силе поверхностного натяжения, действующей на единицу длины контура, который ограничивает поверхность жидкости.

Сила $\vec{F}$ действует по касательной к поверхностному слою и перпендикулярно к линии его границы.

Примечание: коэффициент поверхностного натяжения жидкости можно определить путём отрыва капель: в момент перед отрывом капли величины силы поверхностного натяжения ($F_{\text{жид}} = \alpha l$) и силы тяжести ($F_{\text{тяж}} = mg$) равны:

$\alpha l = mg$ откуда:

$$\alpha = \frac{mg}{l} = \frac{mg}{2\pi r}, \qquad (6.4)$$

где r – внутренний радиус трубки.

Основные законы

III.6. Закон Лапласа выражает давление под искривлённой поверхностью жидкости:

$$p_{жид} = p_0 + \alpha \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right), \tag{6.5}$$

где p_0 – давление при плоской поверхности жидкости, R_1 и R_2 – главные радиусы кривизны (радиусы кривизны двух взаимно перпендикулярных сечений). Избыточное давление, создаваемое в жидкости вследствие кривизны её поверхности:

$$p = \alpha \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right). \tag{6.6}$$

В случае сферической поверхности жидкости ($R_1 = R_2 = R$):

$$p = \frac{2\alpha}{R}. \quad \text{- Формула Лапласа.} \tag{6.7}$$

Пример 7. Какую работу нужно совершить чтобы выдуть мыльный пузырь радиусом 5 см? Коэффициент поверхностного натяжения мыльного раствора $\alpha = 0{,}04$ Н/м. Чему равно добавочное давление внутри мыльного пузыря?

Дано	Решение
$R = 5$ см $= 5 \cdot 10^{-2}$ м $\alpha = 0{,}04$ Н/м	По формуле Лапласа давление создаваемое сферической поверхностью жидкости $p = \frac{2\alpha}{R}$.
$p, A-?$	Пленка мыльного пузыря имеет две сферические поверхности: внешнюю и внутреннюю. Так как толщина пленки мала, то диаметры обеих поверхностей можно считать одинаковыми, поэтому

добавочное давление $p = 2\,\frac{2\alpha}{R} = \frac{4\alpha}{R}$, где α - коэффициент поверхностного натяжения.

Произведем вычисления:

$p = \frac{4 \cdot 40 \cdot 10^{-2}}{5 \cdot 10^{-2}} = 3{,}2$ (Па).

Увеличение поверхности жидкости при выдувании пузыря связано с приростом поверхностной энергии: $\Delta E = \alpha \cdot \Delta S$. (1)

Работа – мера изменения энергии, т.е. совершаемая при выдувании пузыря работа против сил поверхностного натяжения равна $A = \Delta E$. (2)

Площадь двух поверхностей пузыря $\Delta S \approx 2 \cdot 4\,\pi R^2$. (3)

Из (1)-(3) $A = \alpha \cdot 8\,\pi R^2, \pi = 3{,}14$ (табл.).

Произведем вычисления:

$A = 40 \cdot 10^{-2} \cdot 8 \cdot 3{,}14 \cdot 25 \cdot 10^{-4} \approx 2{,}5 \cdot 10^{-3}$ (Дж)

<u>Приложение:</u> площадь поверхности шара – см. “Приложение” №19.

Задачи для самостоятельного решения

Порядок выполнения контрольной работы

1. Внимательно прочитайте соответствующие разделы учебного пособия.
2. Прочитайте соответствующий материал по учебнику.
3. После усвоения теоретических положений рассмотрите примеры решения задач в пособии.
4. Внимательно прочитайте условие задачи, запишите краткое условие («Дано»), переведите единицы измерения в СИ.
5. Сделайте к задаче поясняющий рисунок.
6. Опираясь на математические формулы для основных понятий и законов, получите рабочую (конечную) формулу.
7. При необходимости найдите в справочнике значение постоянных величин.
8. Подставив в конечную формулу числовые значения, произведите расчеты.
9. Запишите ответ с указанием единиц измерения.

Таблица вариантов

Номер варианта определяется последней цифрой шифра

Вариант	Номера задач				
1	1	11	21	31	41
2	2	12	22	32	42
3	3	13	23	33	43
4	4	14	24	34	44
5	5	15	25	35	45
6	6	16	26	36	46
7	7	17	27	37	47
8	8	18	28	38	48
9	9	19	29	39	49
0	10	20	30	40	50

Рекомендации: для решения задач № 1-10 прочитайте в части I разделы I.1 и I.2 и рассмотрите пример № 1

1. Точка движется по окружности радиусом 4 м. Начальная скорость точки равна 3 м/с, тангенциальное ускорение 1 м/с^2. Для момента времени 2 с определить:

1) длину пути S, пройденного точкой;

2) угловую скорость ω;

3) полное ускорение a и угловое ускорение ε.

Указать на рисунке направление векторов $\vec{\upsilon}, \vec{a}_\tau, \vec{a}_n, \vec{a}, \vec{\omega}, \vec{\varepsilon}$.

2. По дуге окружности радиусом 10 м движется точка. В некоторый момент времени нормальное ускорение точки 4,9 м/с^2. В этот момент векторы полного и нормального ускорений образуют угол 60°. Найти скорость υ, тангенциальное ускорение a_τ, угловую скорость ω и угловое ускорение ε точки. Указать на рисунке направление векторов $\vec{\upsilon}, \vec{a}_\tau, \vec{a}_n, \vec{a}, \vec{\omega}, \vec{\varepsilon}$.

3. Точка движется по окружности радиусом 2 м согласно уравнению $S = At^3$, где $A = 2$ м/с^3. В какой момент времени t нормальное ускорение a_n будет равно тангенциальному a_τ? Определить полное ускорение a, угловое ускорение ε и скорость υ в этот момент. Указать на рисунке направление векторов $\vec{\upsilon}, \vec{a}_\tau, \vec{a}_n, \vec{a}, \vec{\omega}, \vec{\varepsilon}$.

4. Точка движется по окружности согласно уравнению $S = At^2 + Bt$, где A=4 м/с^2, B=2 м/с. В момент времени 0,8 с нормальное ускорение точки 16,8 м/с^2. Определить радиус окружности R, полное ускорение a и угловое ускорение ε в этот момент времени. Указать на рисунке направление векторов $\vec{\upsilon}, \vec{a}_\tau, \vec{a}_n, \vec{a}, \vec{\omega}, \vec{\varepsilon}$.

5. Диск радиусом 20 см вращается согласно уравнению $\varphi = A + Bt + Ct^3$, где $A = 3$ рад, $B = -1$ рад/с, $C = 0{,}1$ рад/с^3. Определить тангенциальное a_τ, нормальное a_n и полное a ускорения точек на окружности диска для момента времени $t = 10$ с. Чему равна угловая скорость ω и угловое ускорение ε диска в этот момент. Указать на рисунке направление векторов $\vec{\upsilon}, \vec{a}_\tau, \vec{a}_n, \vec{a}, \vec{\omega}, \vec{\varepsilon}$.

6. По дуге окружности радиусом 6 м движется точка. В некоторый момент времени тангенциальное ускорение точки 5,4 м/с^2. В этот момент времени векторы полного и тангенциального ускорений образуют угол 30°. Найти скорость υ, нормальное ускорение a_n, угловую скорость ω и угловое ускорение ε. Указать на рисунке направление векторов $\vec{\upsilon}, \vec{a}_\tau, \vec{a}_n, \vec{a}, \vec{\omega}, \vec{\varepsilon}$.

7. Точка движется по окружности радиусом R, начальная скорость точки равна 4 м/с, тангенциальное ускорение точки 6 м/с^2. В какой момент времени t длина пути S, пройденного точкой, будет равна 15 м? Для этого момента времени определить угловую скорость ω, угловое ускорение ε, нормальное ускорение a_n. Показать на рисунке направление векторов $\vec{\upsilon}_0, \vec{\omega}, \vec{\varepsilon}, \vec{a}_\tau, \vec{a}_n, \vec{a}$.

8. Точка движется по окружности радиусом 5 м. Начальная скорость υ_0 точки равна 2 м/с, тангенциальное ускорение 1,5 м/с^2. . В какой момент времени t длина пути S, пройденного точкой, будет равна 20 м? Для этого момента времени определить угловую скорость ω, угловое ускорение ε,

нормальное ускорение a_n, полное ускорение a. Показать на рисунке направление векторов $\vec{v}_0, \vec{\omega}, \vec{\varepsilon}, \vec{a}_\tau, \vec{a}_n, \vec{a}$.

9. Точка движется по окружности радиусом 6,2 м согласно уравнению $S = At^3 + Bt$, где $A = 0{,}5$ м/с^3, $B = 4$ м/с. В какой момент времени t нормальное ускорение точки равно 16 м/с^2. Определить для этого момента времени тангенциальное ускорение a_τ, полное ускорение a и угловое ускорение ε. Указать на рисунке направление векторов $\vec{v}, \vec{a}_\tau, \vec{a}_n, \vec{a}, \vec{\omega}, \vec{\varepsilon}$.

10. Диск радиусом 10 см вращается согласно уравнению $\varphi = A + Bt + Ct^3$, где $\mathrm{A} = 5$ рад, $B = -3$ рад/с, $C = 0{,}2$ рад/с^3. Определить момент времени t, когда тангенциальное ускорение точек на окружности диска равно 0,6 м/с^2. Чему равны угловая скорость ω, угловое ускорение ε и полное ускорение a точек на окружности в этот момент времени? Указать на рисунке направление векторов $\vec{v}, \vec{a}_\tau, \vec{a}_n, \vec{a}, \vec{\omega}, \vec{\varepsilon}$.

Рекомендации: для решения задач 11-20 прочитайте в части I разделы I.3 и I.4 и рассмотрите примеры 2 и 5.

11. Брусок массой m_1 скользит по горизонтальной поверхности с ускорением 1,2 м/с^2 под действием груза массой m_2=2 кг (см. рис. 20), прикреплённого к концу нерастяжимой нити, перекинутой через блок. Коэффициент трения бруска о поверхность f=0,2. Найти массу груза m_1 и силы натяжения нити, действующие на грузы. Масса блока, имеющего форму диска, m_3=3 кг, радиус R=20 см. Массой нити и трением в блоке пренебречь.

12. Вал в виде сплошного цилиндра массой m_1=10 кг насажен на горизонтальную ось. На цилиндр намотан шнур, к свободному концу которого подвешена гиря массой m_2=2 кг (см. рис. 21). С каким ускорением будет опускаться гиря, если её предоставить самой себе? Как изменится это ускорение, если учесть, что момент силы трения при вращении блока $M_{\text{тр}}$=0,9 Н·м, а радиус блока 10 см.

13. Брусок массой m_1=2 кг скользит по горизонтальной поверхности под действием груза массой m_2=0,5 кг, прикрепленного к концу нерастяжимой нити, перекинутой через блок (см. рис. 20). Коэффициент трения бруска о поверхность равен 0,1. Найти ускорение движения тела и силы натяжения нити. Масса блока m_3=0,2 кг, радиус R=5 см. Блок имеет форму диска. Массой нити и трением в блоке пренебречь.

14. Блок укреплен в вершине наклонной плоскости, составляющий с горизонтом угол α=30° (см. рис. 22). Гири массами m_1=2 кг и m_2=1 кг соединены невесомой нитью, перекинутой через блок. Коэффициент трения

груза с массой m_2 о наклонную плоскость равен f=0,1. Блок в форме диска имеет массу m_3=0,5 кг и радиус R=20 см. Найти силы натяжения нити, ускорение движения тел и угловое ускорение блока.

15. Брусок массой m_1=1,5 кг скользит по горизонтальной поверхности с ускорением a =5,8 м/с^2 под действием груза массой m_2=4 кг, прикрепленного к концу нерастяжимой нити, перекинутой через блок (см. рис. 22). Найти коэффициент трения бруска о поверхность и силы натяжения нити, действующие на грузы. Масса блока, имеющего форму диска, m_3=1 кг, радиус R=20 см. Массой нити и трением в блоке пренебречь.

16. Брусок массой m_1 скользит по горизонтальной поверхности с ускорением a=1,2 м/с^2 под действием груза массой m_2=2 кг (см. рис. 20), прикреплённого к концу нерастяжимой нити, перекинутой через блок. Коэффициент трения бруска о поверхность f=0,2. Найти массу груза m_1 и силы натяжения нити, действующие на грузы. Масса блока, имеющего форму диска, m_3=3 кг, радиус R=20 см. Массой нити и трением в блоке пренебречь.

17. Брусок массой m_1=2 кг скользит по горизонтальной поверхности под действием груза массой m_2=0,5 кг, прикрепленного к концу нерастяжимой нити, перекинутой через блок (см. рис. 20). Коэффициент трения бруска о поверхность равен 0,1. Найти ускорение движения тела и силы натяжения нити. Масса блока m_3=0,2 кг, радиус R=5 см. Блок имеет форму диска. Массой нити и трением в блоке пренебречь.

18. Блок укреплен в вершине наклонной плоскости (см. рис. 22), составляющей с горизонтом угол α=45°. Гири с массами m_1=3 кг и m_2=2 кг соединены невесомой нитью, перекинутой через блок. Масса блока, имеющего форму диска, m_3=1,5 кг, радиус R=30 см. Груз массой m_1 движется вниз с ускорением a=2,2 м/с^2. Найти коэффициент трения груза с массой m_2 о наклонную плоскость, силы натяжения нити и угловое ускорение блока.

19. Блок укреплен в вершине наклонной плоскости (см. рис. 22), составляющей с горизонтом угол α=60°. Гири с массами m_1=2,5 кг, m_2=1,6 кг соединены невесомой нитью и перекинутой через блок. Блок имеет форму диска массой m_3 и радиусом $R = 15$ см. Коэффициент трения груза с массой m_2 о наклонную плоскость f =0,12. Груз массой m_1 движется вниз с ускорением a =1,4 м/с^2. Найти массу блока m_3, силы натяжения нити и угловое ускорение блока.

20. Блок укреплен в вершине наклонной плоскости, составляющий с горизонтом угол $\alpha = 30°$. Гири массами m_1=2 кг и m_2=1 кг соединены невесомой нитью, перекинутой через блок (см. рис. 22). Коэффициент трения груза с массой m_2 о наклонную плоскость равен f=0,1. Блок в форме диска

имеет массу m_3=0,5 кг и радиус R=20 см. Найти силы натяжения нити, ускорение движения тел и угловое ускорение блока.

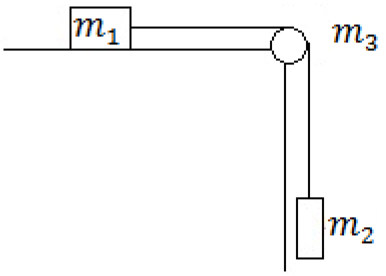


Рис. 19

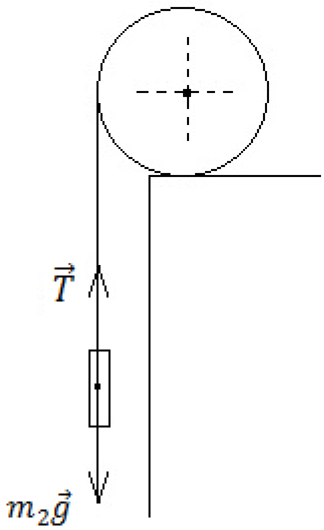


Рис. 20

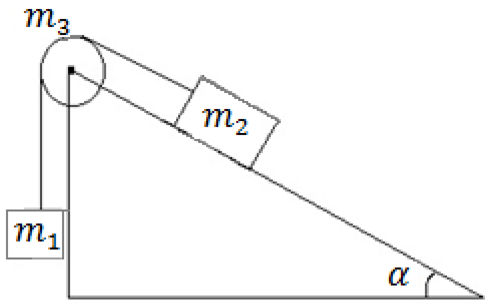


Рис. 21

Рекомендации: для решения задач № 21-30 прочитайте в части I раздел I.3 и рассмотрите примеры 3 и 4.

21. На абсолютно гладкой горизонтальной плоскости покоятся два упругих бруска одинаковой массы $m = 0{,}5$ кг, скрепленных пружиной длиной l. Коэффициент упругости пружины равен f=75 Н/м. На левый брусок налетает со скоростью $\vec{v}$=4 м/с третий брусок, имеющий такую же массу m. Определить скорости скрепленных брусков в момент, когда абсолютная деформация пружины Δx=20 см.

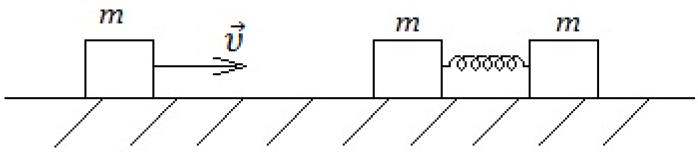


Рис. 22

22. В покоящийся шар массой M=1 кг, подвешенный на длинном жестком стержне, закрепленном в подвеске на шарнире, попадает пуля массой $m = 0{,}01$ кг. Угол между направлением полета пули и стержнем равен $\alpha = 45°$ (см. рис. 24). Удар центральный. После удара пуля застревает в шаре и шар вместе с пулей, отклонившись, поднимается на высоту h=0,12 м

относительно первоначального положения. Найти скорость пули υ. Массой стержня пренебречь.

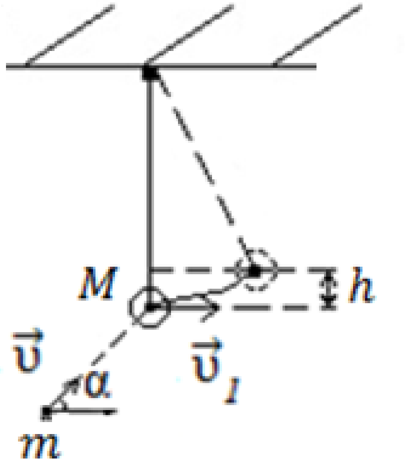


Рис. 24

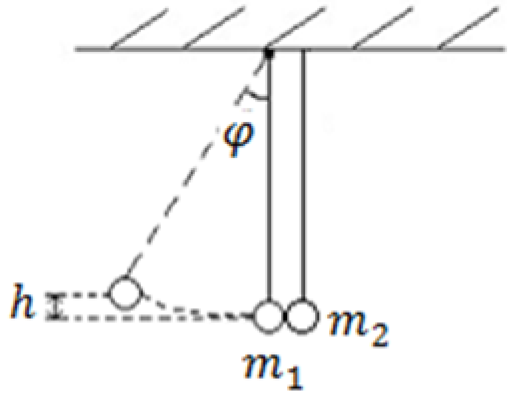


Рис. 23

23. Два груза массами m_1=10 кг и m_2=15 кг подвешены на нитях длиной $l = 2$ м так, что грузы соприкасаются между собой (см. рис. 25). Меньший груз был отклонен на угол $\varphi = 60°$ и отпущен. Определить высоту h, на которую поднимутся оба груза после удара. Удар грузов считать неупругим.

24. Два груза массами $m_1 = 3$ кг и $m_2 = 5$ кг подвешены на нитях длиной $l = 1$ м так, что грузы соприкасаются между собой (см. рис.20). Меньший груз был отклонен на угол $\varphi = 30°$ и отпущен. Определить высоту h, на которую поднимется второй груз после удара. Удар грузов считать абсолютно упругим, скорость первого шара после удара υ_1=0,5 м/с и направлена по ходу его движения.

25. Груз массой m_1=0,5 кг падает с некоторой высоты на плиту массой m_2=1 кг, укрепленную на пружине с коэффициентом жесткости $k = 9{,}8 \cdot 10^2$ Н/м. Определить величину наибольшего сжатия пружины, если в момент удара груз обладал скоростью υ=5 м/с. Удар неупругий.

26. Пуля, летящая горизонтально, попадает в шар, подвешенный на легком жестком стержне, и застревает в нем. Масса пули в 500 раз меньше массы шара. Расстояние от точки подвеса стержня до центра шара равно $l = 1$ м. Найти скорость пули, если известно, что стержень с шаром отклонится после удара на угол α =30°.

27. При центральном упругом ударе движущееся тело массой m_1 (см. рисунок) ударяется в покоящееся тело массой m_2 (см. рис. 26), в результате чего скорость уменьшается в 2 раза. Определить:

1) во сколько раз масса первого тела больше массы второго тела;

2) кинетическую энергию T_2 второго тела непосредственно после удара, если первоначальная кинетическая энергия T_1 первого тела равна 800 Дж.

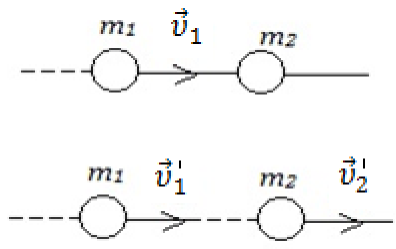


Рис. 26

28. Человек стоит на неподвижной тележке и бросает горизонтально камень массой m=8 кг со скоростью v_1=5 м/с относительно Земли. Определить какую при этом человек совершает работу, если масса тележки вместе с человеком M=160 кг.

29. Снаряд массой m_1=100 кг вылетел из орудия с начальной скоростью v_0 под углом $\alpha = 30°$ к горизонту. При этом орудие массой $m_2 = 1$ т приобрело скорость $v = 43{,}3$ м/с. Пренебрегая сопротивлением воздуха, найти работу силы тяжести над снарядом и высоту подъема снаряда.

30. Снаряд массой m_1 вылетел из орудия с начальной скоростью v_0=600 м/с под углом α=60° к горизонту и поднялся на высоту h=3 км. При этом орудие массой m_2=1,5 т приобрело скорость $v = 12$ м/с. Пренебрегая сопротивлением воздуха, найти работу силы тяжести над снарядом и массу этого снаряда.

Рекомендации: для решения задач № 31-40 прочитайте в части I раздел II и рассмотрите пример 6.

31. Кислород массой 32 г находится в закрытом сосуде под давлением 0,1 МПа при температуре 290 К. После нагревания давление в сосуде повысилось в 4 раза. Определите:

1. объём сосуда;
2. температуру, до которой газ нагрели;
3. количество теплоты, сообщённое газу.

Постройте график процесса.

32. Кислород совершает два последовательных процесса - изотермический и изобарный. Два моля газа изотермически сжимают от объёма V_1=5 л до V_2=2 л, а в результате изобарного процесса газ нагревается до температуры T=600 К и расширяется до V_3=4 л. Постройте графики процессов и определите количество теплоты, полученное газом.

33. Водород (ν=3 моль), занимающий объём $V_1 = 2$ л и находящийся под давлением p_1=1 МПа, подвергли изохорному нагреванию до температуры 227℃. После этого газ подвергли изотермическому расширению до начального давления. Постройте графики процессов и определите количество теплоты, полученное газом.

34. Гелий (4 моль), занимающий объём V_1=3 л и находящийся под давлением p_1=2 МПа, подвергли изобарному расширению до объёма V_2=6 л. После этого газ подвергли изохорному охлаждению до температуры Т=180 К . Постройте графики процессов и определите количество теплоты, полученное газом.

35. Сосуд объёмом V=20 л содержит водород при температуре T_1 = 300 К под давлением p_1=0,4 МПа. Каковы будут температура T_2 и давление p_2, если газу сообщить количество теплоты Q=6 кДж. Построить график процесса.

36. При изотермическом расширении азота (ν=2 моль), находящегося при нормальных условиях, его объём увеличился в 3 раза. Определите работу расширения газа и количество подведенной к газу теплоты. какое количество теплоты надо сообщить газу при таком же изобарном расширении. Построить графики процессов.

37. Кислород массой m=2 кг занимает объём V_1=1 м^3 и находится под давлением p_1=0,2 МПа. Газ был нагрет сначала при постоянном давлении до объёма V_2=3 м^3, а затем при постоянном объёме до давления p_3= 0,5 МПа. Найти:

1) количество теплоты Q, переданное газу;
2) совершенную газом работу A.

Построить график процессов.

38. Азот массой m=0,2 кг занимает объём V_1=5 м^3 и находится под давлением $p_1 = 0{,}2$ МПа. Газ изотермически сжали до объёма V_2=3 м^3, а затем при постоянном давлении вернули в прежний объём. Найти:

1) количество теплоты Q, полученное газом;
2) совершенную газом работу A.

Построить график процессов.

39. Сосуд объёмом V =7 л содержит кислород при температуре T_1=310 К под давлением p_1= 0,6 МПа. Каковы будут температура T_2 и давление p_2, если газу сообщить количество теплоты Q =7 кДж? Построить график процессов.

40. Водород массой m=0,2 кг занимает объём V_1=0,5 м^{3}и находится под давлением p_1=0,6 МПа. Газ был нагрет сначала при постоянном давлении до объёма до V_2=2 м^3, а затем изотермически расширен до V_3=4 м^3. Найти:

1. количество теплоты Q, полученное газом;
2. совершенную газом работу A. Построить график процессов.

Рекомендации: для решения задач № 41-50 прочитайте в части I раздел III и рассмотрите пример 7.

41. Какую работу надо совершать при выдувании мыльного пузыря, чтобы увеличить его объем от 8см^3 до 16см^3?

42. При пропускании через пипетку 4см^3 жидкого масла получено 304 капли. Диаметр отверстия пипетки 1,2 мм, плотность масла $0{,}9 \cdot 10^3$ кг/м^3. Найти коэффициент поверхностного натяжения масла.

43. Какая энергия выделяется при слиянии двух капель ртути радиусом 0,4 мм и 0,6 мм в одну каплю?

44. Какую энергию необходимо затратить, чтобы увеличить вдвое объем мыльного пузыря радиусом 1 см? Коэффициент поверхностного натяжения мыльного раствора 0,04 Н/м.

45. Определить давление внутри воздушного пузырька диаметром 4 мм, находящегося у самой поверхности воды. Считать атмосферное давление нормальным.

46. При слиянии мелких водяных капель одинакового размера в одну большую каплю радиусом 4 мм выделяется энергия $1{,}4 \cdot 10^{-2}$ Дж. Определить радиус малой капли.

47. На сколько давление воздуха внутри мыльного пузыря радиусом 3 мм больше нормального атмосферного давления?

48. Какое количество энергии поглощается при разбивании большой капли воды массой 2г на мелкие капли радиусом 10^{-5} см?

49. Две капли ртути диаметром 2 мм каждая сливаются в одну большую каплю. Определить энергию, которая выделяется при этом слиянии.

50. Керосин вытекает из отверстия трубки диаметром 1,8 мм. Сколько капель керосина получится из 1см^3 при температуре 20 °C?

Табличные данные

I. Физические постоянные (приблизительные значения)

Гравитационная постоянная		G=6,67·10^{-11} Н · м^2/кг^2
Постоянная Авогадро		N_A=6·10^{23} моль$^{-1}$
Молярная (универсальная) газовая постоянная		R=8,31 Дж/моль · К
Постоянная Больцмана		k=1,38· 10^{-23} Дж/К
Ускорение свободного падения		g=9,8 м/с^2
Нормальные условия	атмосферное давление	p_0=10^5 Па
	температура	$t = 0$°С

II. Астрономические постоянные

Радиус Земли	$R_з$=6,38·10^6 м
Масса Земли	$R_з$=6·10^{24} кг

III. Свойства вещества

1. Плотность жидкости (кг/м^3).

вода	$1{,}0 \cdot 10^3$	керосин	$0{,}8 \cdot 10^3$
ртуть	$13{,}6 \cdot 10^3$	касторовое масло	$0{,}9 \cdot 10^3$

2. Коэффициент поверхностного натяжения жидкости (Н/м).

вода	0,073	мыльный раствор	0,04
ртуть	0,5	касторовое масло	0,035
керосин	0,03		

IV. Основные единицы системы СИ

	Единица	
	название	обозначение
Длина	метр	м
Масса	килограмм	кг
Время	секунда	с
Термодинамическая температура	кельвин	К
Количество вещества	моль	моль

V. Единицы механических и тепловых величин

Величина	Единицы		
	определение	наименование	обозначение
Площадь	$S = l^2$	квадратный метр	$м^2$
Объем	$V = l^3$	кубический метр	$м^3$
Скорость	$\upsilon = \frac{dx}{dt}$	метр в секунду	$м/с$
Ускорение	$a = \frac{d\upsilon}{dt}$	метр на секунду в квадрате	$м/с^2$
Угловая скорость	$\omega = \frac{d\varphi}{dt}$	радиан в секунду	$рад/с$
Угловое ускорение	$\varepsilon = \frac{d\omega}{dt}$	радиан на секунду в квадрате	$рад/с^2$
Частота вращения	$\nu = T^{-1}$	секунда в минус первой степени	$с^{-1}$
Плотность	$\rho = m/V$	килограмм на кубический метр	$кг/м^3$
Сила	$F = ma$	ньютон	Н
Давление	$p = \frac{F}{S}$	паскаль	Па
Жесткость (коэффициент упругости)	$k = \frac{F}{l}$	ньютон на метр	$Н/м$
Импульс силы	$p = F \cdot \Delta t$	ньютон - секунда	Н·с
Импульс (тела)	$p = m \cdot \upsilon$	килограмм - метр в секунд	$кг \cdot м/с$
Момент силы	$M = F \cdot l$	ньютон - метр	Н·м
Момент инерции	$J = mr^2$	килограмм - метр в квадрате	$кг \cdot м^2$
Момент импульс	$L = I \cdot \varepsilon$	килограмм - метр в квадрате в секунду	$кг \cdot м^2/с$
Работа Энергия	$A = F \cdot l$	джоуль	Дж
Мощность	$N = \frac{A}{t}$	ватт	Вт
Теплота	$Q = A$	джоуль	Дж
Удельная теплоемкость	$c = \frac{Q}{m \cdot \Delta T}$	джоуль на килограмм - кельвин	$Дж/кг \cdot К$

Молярная теплоемкость	$C = \dfrac{Q}{\nu \cdot \Delta T}$	джоуль на моль - кельвин	$Дж/_{моль \cdot К}$
Коэффициент поверхностного натяжения	$\alpha = \dfrac{F}{l}$	ньютон на метр	$Н/_{м}$

ЧАСТЬ II.

Электричество и магнетизм.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА
ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ

Электрическое поле в вакууме.

Заряженные тела. Закон сохранения электрического заряда. Закон Кулона. Электрическое поле. Напряженность электрического поля. Силовые линии поля. Теорема Гаусса и ее применение к расчету поля заряженных тел. Работа сил электрического поля. Потенциал поля. Связь между потенциалом и напряженностью поля. Эквипотенциальные поля.

Электрическое поле в диэлектриках.

Свободные и связанные заряды в диэлектриках. Электрический диполь. Диполь во внешнем электрическом поле. Вектор поляризации. Диэлектрическая восприимчивость и ее зависимость от температуры. Диэлектрическая проницаемость. Вектор электрического смещения.

Проводники в электрическом поле.

Равновесие зарядов на проводнике. Напряженность электрического поля внутри и вблизи поверхности заряженного проводника. Электроемкость уединенного проводника. Взаимная емкость двух проводников. Конденсаторы и их применение. Энергия электростатического поля. Объемная плотность энергии.

Законы постоянного тока.

Сила и плотность тока. Условия существования тока. Сторонние силы. Электродвижущая сила. Гальванические элементы, аккумуляторы и их применение. Напряжение. Сопротивление проводников. Закон Ома для однородного участка цепи. Закон Ома в дифференциальной форме. Работа и мощность тока. Закон Джоуля – Ленца. Закон Ома для неоднородного участка цепи. Правило Кирхгофа.

Электрический ток в металлах.

Основы классической электронной теории металлов. Вывод закона Ома. Электропроводимость и теплопроводность металлов. Температурная зависимость сопротивления металлов. Термометры сопротивления. Понятие о сверхпроводимости. Применение сверхпроводников. Недостатки классической электронной теории металлов.

Магнитное поле постоянных токов.

Опыт Эрстеда. Магнитное взаимодействие электрических токов. Вектор магнитной индукции. Линии магнитной индукции. Закон Био-Савара-Лапласа и его применение к расчету магнитных полей прямого и кругового токов. Закон полного тока. Магнитное поле соленоида.

Движение заряженных частиц в магнитном поле.

Действие магнитного поля на движущийся заряд. Сила Лоренца. Эффект Холла. Магнитное поле Земли как «защитный пояс».

Действие магнитного поля на проводник с током.

Сила Ампера. Контур с током в магнитном поле. Магнитный момент контура с током. Принципы работы электродвигателей. Магнитный поток. Работа, совершаемая при перемещении проводника с током в магнитном поле.

Магнитное поле в веществе.

Магнитные моменты электронов и атомов. Намагничивание сред. Природа намагничивания. Молекулярные и поверхностные токи. Вектор намагничивания. Магнитная восприимчивость. Магнитная проницаемость. Элементарная теория диа- и парамагнетизма. Ферромагнетики. Кривые намагничивания. Магнитный гистерезис. Остаточное намагничивание. Коэрцитивная сила.

Электромагнитная индукция.

Явление электромагнитной индукции. Опыты Фарадея. Электродвижущая сила индукции. Закон Фарадея. Закон Ленца. Природа ЭДС электромагнитной индукции. Явление самоиндукции. Индуктивность (коэффициент самоиндукции) контура. Индуктивность соленоида. ЭДС самоиндукции. Взаимная индукция. Трансформаторы. Энергия магнитного поля.

Список литературы

1. Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Высшая школа, 2005, 2007, 557с.

2. Дмитриева В.Ф. Основы физики. М.: Высшая школа, 2003, 527с.

3. Дмитриева В.Ф. Физика. М.: Издательский центр «Академия», 2006, 461 с.

4. Сивухин Д.В. Общий курс физики. М.: Физматлит, 2005, 552 с.

5. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. М.: Высш. шк., 2002, 718 с.

I. ЭЛЕКТРОСТАТИКА.

Основные понятия.

II.1.1. Заряд (q или Q)–скалярная величина, определяющая способность тел быть источником электромагнитных полей и принимать участие в электромагнитном взаимодействии.

Свойства:

a) существует только два типа электрических зарядов: положительные и отрицательные, на рисунках обозначаются $+q$ или $-q$;

b) одноименные (одного знака) заряды отталкиваются, разноименные – притягиваются;

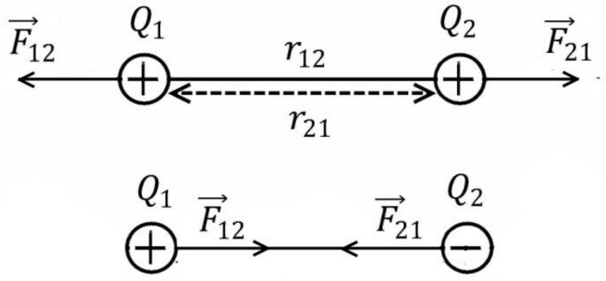


Рис. 25

электрический заряд дискретен – составляет целое кратное от элементарного электрического заряда e ($e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл). Частицы вещества электрон и протон являются соответственно носителями элементарных отрицательного и положительного зарядов.

c) Заряды взаимодействуют бесконтактно.

II.1.2. Электрическое поле − форма материи, посредствам которой осуществляется взаимодействие электрических зарядов.

II.1.3. Пробный заряд (Q_0) − точечный положительный заряд, который вносится в исследуемое электрическое поле, не искажая его (не вызывает перераспределения зарядов, создающих поле).

II.1.4. Напряженность электрического поля ($\vec{E}$) − силовая характеристика поля, определяемая силой, действующей на пробный заряд, помещенный в данную точку поля:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{Q_0}. \tag{1.1}$$

II.1.5. Силовые линии (линии напряженности) – графический способ изображения электростатических полей: линии, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением $\vec{E}$. Направлены от положительного заряда (или из бесконечности) к отрицательному заряду (или в бесконечность).

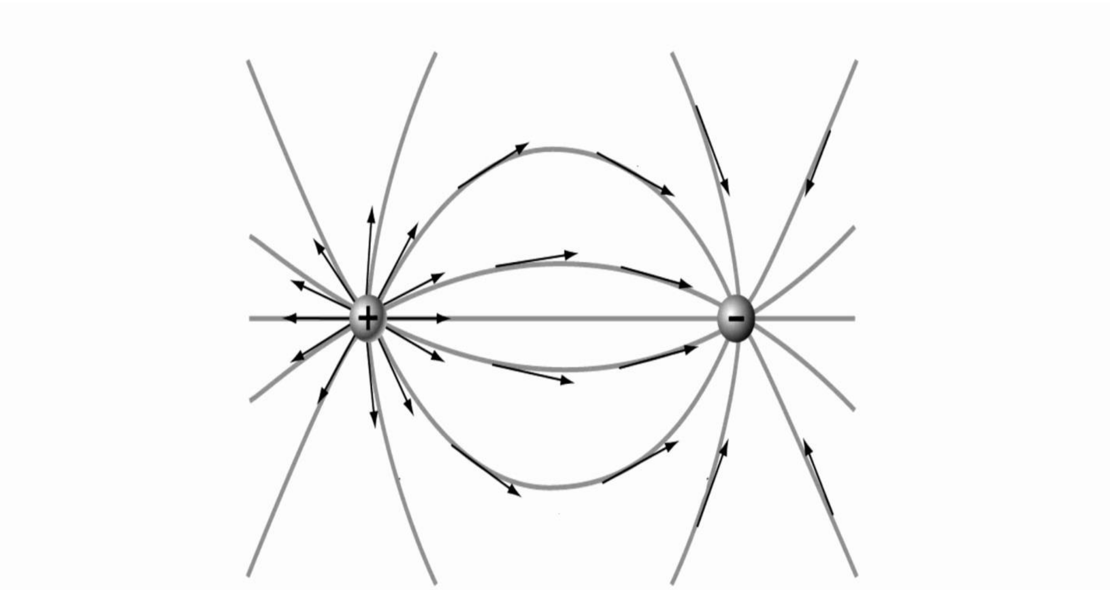


Рис. 26

Частный случай: $\vec{E} = const$ – однородное поле; линии напряженности параллельны и имеют одинаковую густоту. Создается внутри плоского конденсатора.

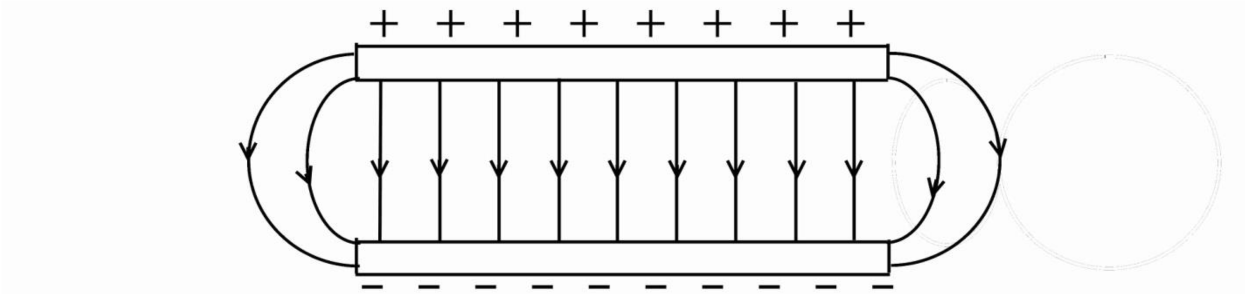


Рис. 27

II.1.6. Поток вектора напряженности (Φ_E)– физическая величина, равная числу линий напряженности, проходящих через поверхность S, перпендикулярную силовым линиям поля. $d\Phi_E$ – скалярная величина, равная скалярному произведению $\vec{E}$ и $d\vec{S}$, т.е.

$$\Phi_E = \int_S \left(\vec{E} \cdot d\vec{S}\right) \tag{1.2}$$

Для однородного электрического поля ($\vec{E} = const$):

$$\Phi_E = E \cdot S \cdot \cos\alpha = E_n \cdot S, \tag{1.3}$$

где α – угол между $\vec{E}$ и нормалью $\vec{n}$ к площадке S, E_n –проекция $\vec{E}$ на направление нормали.

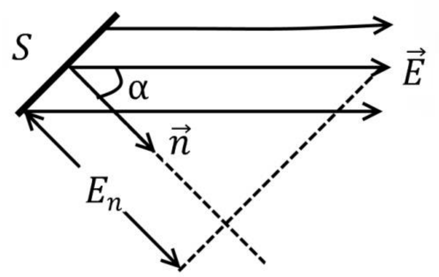


Рис. 28

II.1.7. Потенциал электрического поля (φ) – энергетическая характеристика поля: потенциальная энергия единичного положительного заряда, помещённого в данную точку поля:

$$\varphi = \frac{U}{Q_0}, \tag{1.4}$$

где U – потенциальная энергия пробного заряда Q_0, находящегося в поле заряда q.

Потенциал поля – алгебраическая величина: его знак совпадает со знаком заряда q, образующего электростатическое поле.

II.1.8. Разность потенциалов электрического поля – работа A, совершаемая силами поля при перемещении единичного положительного заряда из точки 1 в точку 2:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A_{12}}{Q_0}. \tag{1.5}$$

Основные законы.

II.1.9. Закон сохранения заряда: алгебраическая сумма электрических зарядов любой замкнутой системы (системы, не обменивающейся зарядами с внешними телами) остаётся неизменной, какие бы процессы ни происходили внутри этой системы:

$$\sum_{i=1}^{n} q_i = const. \tag{1.6}$$

II.1.10. Закон Кулона: сила взаимодействия F двух неподвижных точечных зарядов пропорциональна произведению модулей зарядов Q_1и Q_2, обратно пропорциональна квадрату расстояния r между ними и зависит от окружающей среды:

$$F = k\,\frac{|Q_1|\cdot|Q_2|}{\varepsilon r^2}, \tag{1.7}$$

где $k = \dfrac{1}{4\pi\varepsilon_0}$, ε_0 – электрическая постоянная, ε – относительная диэлектрическая проницаемость окружающей среды. Значение ε берется из таблицы. Для вакуума $\varepsilon = 1$, для воздуха $\varepsilon = 1,006 \approx 1$.

Сила $\vec{F}$ направлена по прямой, соединяющей заряды.

II.1.11. Принцип суперпозиции электрических полей: если в какой-либо точке пространства одновременно присутствует несколько электрических полей, то эти поля действуют независимо, поэтому их характеристики можно сложить:

$$\vec{E} = \sum_{i=1}^{n} \vec{E}_i, \tag{1.8}$$

$$\varphi = \sum_{i=1}^{n} \varphi_i, \tag{1.9}$$

где (1.8) – векторная сумма, (1.9) – алгебраическая сумма, $\vec{E}$ и φ соответственно напряженность и потенциал результирующего поля.

II.1.12. Теорема Гаусса: поток вектора напряженности электростатического поля через замкнутую поверхность произвольной формы пропорционален алгебраической сумме зарядов, заключенных внутри этой поверхности, и зависит от окружающей среды:

$$\varPhi_E = \frac{1}{\varepsilon_0\varepsilon}\sum_{i=1}^{n} q_i, \tag{1.10}$$

ε_0 – электрическая постоянная, ε – диэлектрическая проницаемость среды.

Для полей, создаваемых зарядами правильной геометрической формы на основании (1.2) и (1.10) получены формулы для расчета модуля напряженности:

a) равномерно заряженная бесконечная плоскость:

$$E_{\text{пл}} = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0\varepsilon}, \tag{1.11}$$

где σ – поверхностная плотность заряда: заряд, приходящийся на единицу площади поверхности;

b) равномерно заряженная бесконечная нить (или бесконечно длинный цилиндр):

$$E_H = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0\varepsilon}\frac{\tau}{r}\,, \tag{1.12}$$

где τ – линейная плотность заряда: заряд, приходящийся на единицу длины, r – расстояние от нити (или от оси цилиндра) до точки поля;

c) точечный заряд:

$$E_{т.з.} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon}\frac{q}{r^2}\,, \tag{1.13}$$

где q – величина заряда, r – расстояние от заряда до точки поля;

d) плоский конденсатор (однородное электрическое поле):

$$E_{\text{кон}} = \frac{\sigma}{\varepsilon_0\varepsilon}, \tag{1.14}$$

где σ - модуль поверхностной плотности заряда пластины.

II.1.13. <u>Связь напряжённости и потенциала электростатического поля:</u> напряженность $\vec{E}$ поля равна градиенту потенциала со знаком «$-$» (т.е. $\vec{E}$ направлен в сторону убывания φ):

$$\vec{E} = -\overrightarrow{grad}\,\varphi\,, \tag{1.15}$$

<u>Пример 1.</u> Два точечных электрических заряда $Q_1 = 10^{-7}$Кл и $Q_2 = -10^{-7}$Кл находятся на расстоянии 3 см друг от друга. Определить напряжённость $\vec{E}$ электрического поля, создаваемого этими зарядами в точке, удалённой от заряда Q_1 на расстояние 5 см, а от заряда Q_2 на расстояние 4 см.

<u>Дано:</u>

$Q_1 = 10^{-7}$Кл

$Q_2 = -10^{-7}$Кл

$r_1 = 5\text{см} = 5\cdot10^{-2}$м

$r_2 = 4\text{см} = 4\cdot10^{-2}$м

$d = 3\text{см} = 3\cdot10^{-2}$м

$\vec{E}$-?

<u>Решение:</u>

Вектор напряженности электрического поля $\vec{E}_1$ направлен в точке А по силовой линии от заряда Q_1, так как этот заряд положительный; вектор $\vec{E}_2$ направлен также по силовой линии, но к заряду Q_2, так как этот заряд отрицательный.

Согласно принципу суперпозиции электрических полей каждый заряд создаёт поле независимо от присутствия в пространстве других зарядов, поэтому напряжённость электрического поля в указанной точке может быть найдена как геометрическая сумма напряжённостей $\vec{E}_1$ и $\vec{E}_2$ полей, создаваемых каждым зарядом в отдельности:

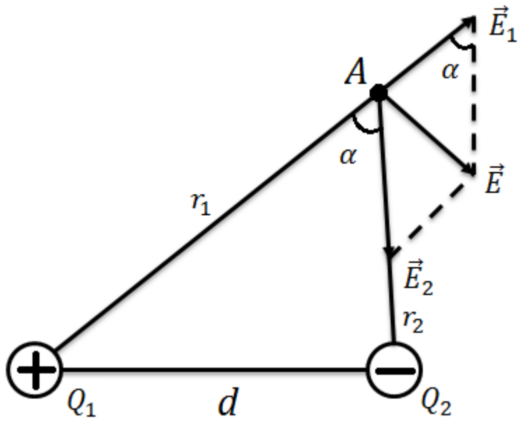
$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2. \tag{1}$$

По теореме Остроградского – Гаусса для точечного заряда:

$$E = \frac{|Q|}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon r^2}\,, \qquad \text{т.е.}$$

$$E_1 = \frac{|Q_1|}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon {r_1}^2}; \tag{2}$$

$$E_2 = \frac{|Q_2|}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon {r_2}^2}. \tag{3}$$



Модуль вектора $\vec{E}$ найдем по теореме косинусов:

$$E^2 = {E_1}^2 + {E_2}^2 - 2\, E_1\, E_2 \cos\, \alpha. \tag{4}$$

Из (2), (3), (4) при условии $\varepsilon \approx 1$ (воздух)

$$E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\sqrt{\frac{{Q_1}^2}{{r_1}^4} + \frac{{Q_2}^2}{{r_2}^4} - 2\frac{|Q_1||Q_2|}{{r_1}^2\,{r_2}^2}\cos\alpha}, \tag{5}$$

где $\pi = 3{,}14$ (табл.), $\varepsilon_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-12}\ \frac{\text{Ф}}{\text{м}}$ (табл). Косинус угла α можно найти из треугольника со сторонами r_1, r_2 и d:

$$d^2 = r_1^2 + r_2^2 - 2r_1 r_2 \cos\alpha,$$

откуда $$\cos\alpha = \frac{{r_1}^2 + {r_2}^2 - d^2}{2\, r_1 r_2};\ \cos\alpha = \frac{(5^2 + 4^2 - 3^2)\cdot 10^{-4}}{2\,\cdot 5 \cdot 4 \cdot 10^{-4}} = \frac{4}{5}.$$

Подставим значения $\cos\alpha$ в (5) и произведем вычисления:

$$E = \frac{1}{4 \cdot 3{,}14 \cdot 8{,}85 \cdot 10^{-12}} \cdot$$

$$\cdot \sqrt{\frac{(10^{-7})^2}{(5\cdot 10^{-2})^4} + \frac{(10^{-7})^2}{(4\cdot 10^{-2})^4} - \frac{2\cdot(10^{-7})\cdot(10^{-7})\cdot 4}{(5\cdot 10^{-2})^2\cdot(4\cdot 10^{-2})^2\cdot 5}} \approx 0{,}35\ \left(\frac{\text{кВ}}{\text{м}}\right).$$

<u>Приложение:</u>

1) сложение вектором – см. “Приложение” №11.

2) теорема косинусов – см. “Приложение” №12.

3) признак равенства углов – см. “Приложение” №9.

Пример 2. Электрическое поле создано длинным цилиндром радиусом R, равномерно заряженным с линейной плотностью τ. Определить работу, совершаемую этим электрическим полем по перемещению заряда q из точки, находящейся на расстоянии a_1 от поверхности цилиндра в точку, находящуюся на расстоянии a_2.

Дано:	Решение:
R, τ, q, a_1, a_2	
A-?	

Работа A сил электрического поля определяется произведением электрического заряда q на разность потенциалов соответствующих точек поля:

$$A = q(\varphi_1 - \varphi_2). \quad (1)$$

Для определения разности потенциалов воспользуемся соотношением между напряженностью поля и потенциалом:

$$\vec{E} = -\overrightarrow{grad}\,\varphi.$$

Для поля с осевой симметрией (таким является поле цилиндра) это соотношение можно записать в виде

$$E = -\frac{d\varphi}{dr}, \quad \text{или} \quad d\varphi = -E \cdot dr.$$

Интегрируя это выражение, найдем разность потенциалов двух точек, отстоящих на расстояниях r_1 и r_2 от оси цилиндра:

$$\int_{\varphi_1}^{\varphi_2} d\varphi = -\int_{r_1}^{r_2} E\,dr\,, \text{т.е.} \;\; \varphi_1 - \varphi_2 = \int_{r_1}^{r_2} E\,dr. \quad (2)$$

Напряжённость поля, создаваемого бесконечно длинным цилиндром

$$E = \frac{\tau}{2\pi\varepsilon_0\varepsilon r}, \quad (3)$$

где r – расстояние от оси цилиндра, ε = 1 – окружающая среда – воздух.

Из (1), (2) и (3)

$$A = q\int_{r_1}^{r_2} \frac{\tau\,dr}{2\pi\varepsilon_0 r} = \frac{q\,\tau}{2\pi\varepsilon_0}\int_{r_1}^{r_2}\frac{dr}{r} = \frac{q\,\tau}{2\pi\varepsilon_0}\ln\frac{r_2}{r_1} = \frac{q\,\tau}{2\pi\varepsilon_0}\ln\frac{R + a_2}{R + a_1}\,. \quad (4)$$

– Рабочая формула.

Приложение: 1) Градиент $(\overrightarrow{grad}\,\varphi)$ – вектор, своим направлением указывающий направление возрастания потенциала электрического поля. Характеризует изменение потенциала на единицу расстояния.

2) $\int \frac{dx}{x} = \ln x.$

3) Свойство логарифма: $\ln\frac{a}{b} = \ln a - \ln b$.

II. ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК.

Основные понятия.

II.2.1. Электрический ток – направленное движение электрических зарядов.

II.2.2. Проводимость – способность тела проводить электрический ток.

II.2.3. Ток проводимости – направленное движение свободных зарядов под действием внешнего электрического поля. За направление тока принято направление движения положительных зарядов.

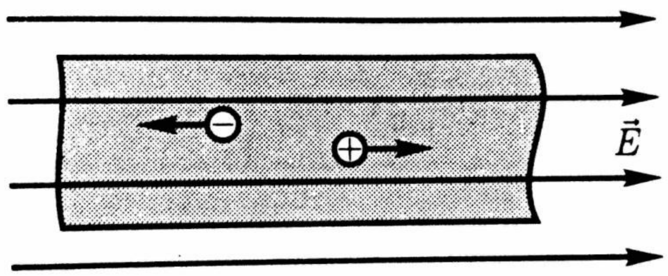


Рис. 29

II.2.4. Проводник – тело, имеющее свободные электрические заряды. Наиболее распространенными проводниками являются металлы; в них валентные электроны слабо связаны с атомами.

II.2.5. Сила тока (I) – скалярная физическая величина, определяемая электрическим зарядом, проходящим через поперечное сечение проводника в единицу времени:

$$I = \frac{dQ}{dt}. \quad (2.1)$$

II.2.6. Плотность тока (j) – сила тока, проходящего через единицу площади поперечного сечения проводника, перпендикулярного направлению тока:

$$j = \frac{dI}{dS}. \quad (2.2)$$

II.2.7. Источник тока – прибор, создающий и поддерживающий разность потенциалов за счёт работы сил неэлектростатического происхождения.

II.2.8. Сторонние силы ($F_{ст}$)– силы неэлектростатического происхождения, под действием которых внутри источника тока электрические заряды движутся против сил электростатического поля.

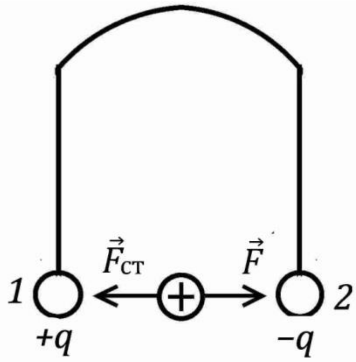


Рис. 30

II.2.9. <u>Электродвижущая сила</u> (ЭДС) (ε) – работа, совершаемая сторонними силами при перемещении единичного положительного заряда:

$$\varepsilon = \frac{A_{ст}}{Q_0}. \qquad (2.3)$$

II.2.10. <u>Электрическое сопротивление проводника</u> (R) –величина, характеризующая свойство проводника препятствовать прохождению электрического тока.

Для линейного проводника

$$R = \rho\,\frac{l}{S}, \qquad (2.4)$$

где ρ - удельное сопротивление проводника (табличная величина, зависит от материала), l - длина проводника, S – площадь сечения.

II.2.11. <u>Напряжение на участке цепи</u> (U) – физическая величина, определяемая работой, совершаемой на данном участке цепи при перемещении единичного заряда одновременно действующими электростатической и сторонней силами:

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon\ , \qquad (2.5)$$

Для однородного участка цепи (на участке не действуют сторонние силы, т.е. $\varepsilon\ =\ 0$):

$$U = \varphi_1 - \varphi_2\,. \qquad (2.6)$$

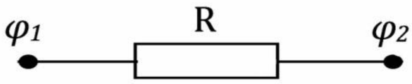


Рис. 31

II.2.12. Работа электрического тока на участке цепи определяется формулой

$$A = I \cdot U \cdot t\,, \qquad (2.7)$$

где t – время прохождения тока.

Основные законы

II.2.13. <u>Закон Ома для однородного участка цепи</u>: сила тока в металлическом проводнике пропорциональна напряжению на концах проводника:

$$I = \frac{U}{R}. \tag{2.8}$$

II.2.14. Закон Ома для замкнутой цепи: сила тока в замкнутом контуре пропорциональна ЭДС источника и обратно пропорциональна сумме сопротивлений внешней цепи (R) и внутреннего сопротивления источника тока (r):

$$I = \frac{\varepsilon}{R+r}. \tag{2.9}$$

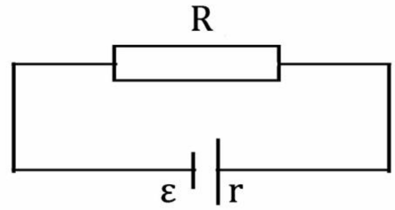


Рис. 32

II.2.15. Закон Джоуля-Ленца: теплота (Q), выделяемая в неподвижном металлическом проводнике при прохождении тока:

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t, \tag{2.10}$$

Пример 3: Ток мощностью N необходимо передать на расстояние l при коэффициенте полезного действия η. Какого сечения нужно взять провод с удельным сопротивлением ρ для линии электропередачи с напряжением U ?

Дано:	Решение:
l, N, η, ρ, U	
$S-?$	Коэффициент полезного действия равен отношению полезной работы ко всей затраченной:

$$\eta = \frac{A_{\text{полезн}}}{A_{\text{затр}}}. \tag{1}$$

Мощность $N = \frac{A}{t}$, т.е. $A = N \cdot t$. (2)

Работа тока $A_{\text{затр}} = I \cdot U \cdot t$. (3)

Потери энергии на нагревание при прохождении тока определяются по закону Джоуля-Ленца:

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t, \tag{4}$$

По закону сохранения энергии $A_{\text{полезн}} = A_{\text{затр}} - Q$ (5)

Из (1),(2),(4) и (5)

$$\eta = \frac{N \cdot t - I^2 \cdot R \cdot t}{N \cdot t} = \frac{N - I^2 \cdot R}{N}. \tag{6}$$

Из (2) и (3) $N = I \cdot U \rightarrow I = \frac{N}{U}$. (7)

Из (6) и (7) $\eta = \dfrac{N - \dfrac{N^2}{U^2} R}{N} = 1 - \dfrac{N}{U^2} R$, отсюда $R = (1 - \eta) \dfrac{U^2}{N}$. (8)

Сопротивление линейного проводника $R = \rho \dfrac{l}{S}$, отсюда $S = \dfrac{\rho l}{R}$. (9)

Из (8) и (9)

$$S = \frac{\rho l N}{(1-\eta) U^2} .$$ – Рабочая формула.

III. МАГНЕТИЗМ

Основные понятия

II.3.1. Магнитное поле – это особый вид материи, специфической особенностью которой является действие на движущийся электрический заряд, проводники с током, тела, обладающие магнитным моментом, с силой, зависящей от вектора скорости заряда, направления силы тока.

II.3.2. Магнитная индукция ($\vec{B}$) – векторная величина, являющаяся силовой характеристикой магнитного поля (его действия на движущиеся заряженные частицы) в данной точке пространства. Магнитная индукция определяется по величине вращающегося момента, действующего со стороны магнитного поля на пробную рамку с током.

II.3.3. Силовые линии магнитного поля (линии магнитной индукции) – графический способ изображения магнитных полей: замкнутые кривые, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением вектора $\vec{B}$.

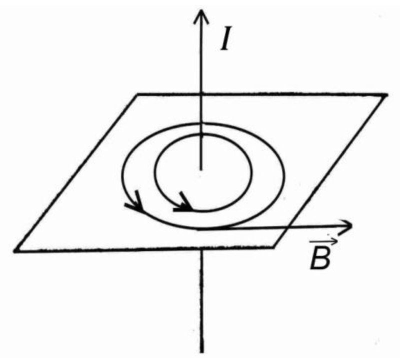


Рис. 33

Их направление определяется правилом правого винта:

а) для кругового тока: если головку винта вращать в плоскости контур с током по направлению тока, то поступательное движение острия винта укажет направление линий индукции в центре и на оси кругового тока;

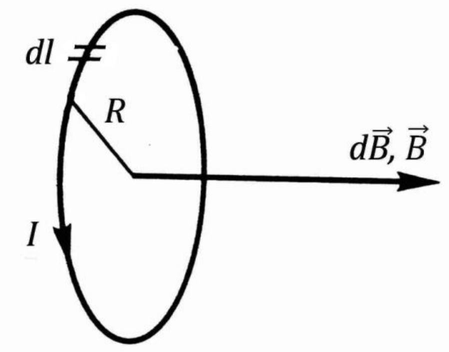


Рис. 34

б) для линейного проводника с током: головка винта, ввинчиваемого по направлению тока, вращается в направлении линий индукции магнитного поля.

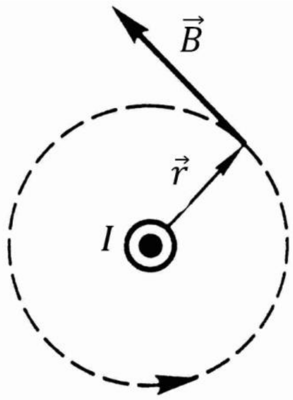


Рис. 35

II.3.4. <u>Вектор напряженности</u> ($\vec{H}$)–характеристика магнитного поля макротоков:

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0 \mu}, \tag{3.1}$$

где μ_0 – магнитная постоянная, μ – магнитная проницаемость окружающей среды.

II.3.5. <u>Поток вектора магнитной индукции</u> (магнитный поток) (Φ_B)– скалярная величина, равная скалярному произведению векторов $\vec{B}$ и $d\vec{S}$:

$$d\Phi_B = \left(\vec{B} \cdot d\vec{S}\right) = B \cos \alpha \; dS, \tag{3.2}$$

где $d\vec{S}$ – вектор, модуль которого равен площади dS,а направление совпадает с вектором нормали $\vec{n}$; α – угол между $\vec{B}$ и вектором нормали $\vec{n}$ к dS.

Из (2) магнитный поток через площадку S равен

$$\Phi_B = \int_S B cos\alpha \, dS = \int_S B_n \, dS, \tag{3.3}$$

где B_n - проекция $\vec{B}$ на нормаль.

Частный случай. Однородное магнитное поле $\left(\vec{B} = const\right)$

$$\Phi_B = B \cdot S \cdot cos\alpha = B_n \cdot S \,, \qquad (3.4)$$

где B_n –проекция $\vec{B}$ на направление нормали.

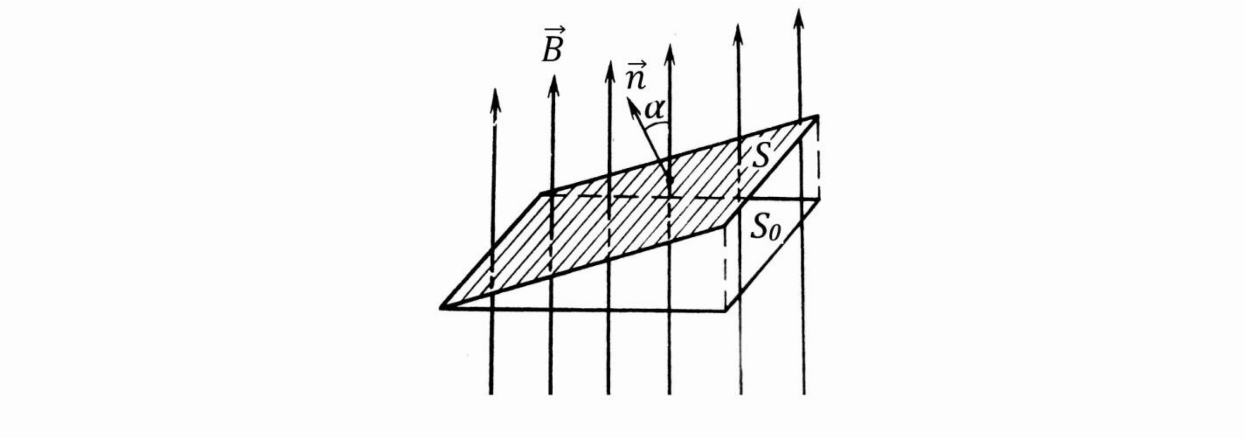


Рис. 36

Однородное поле создается внутри соленоида.

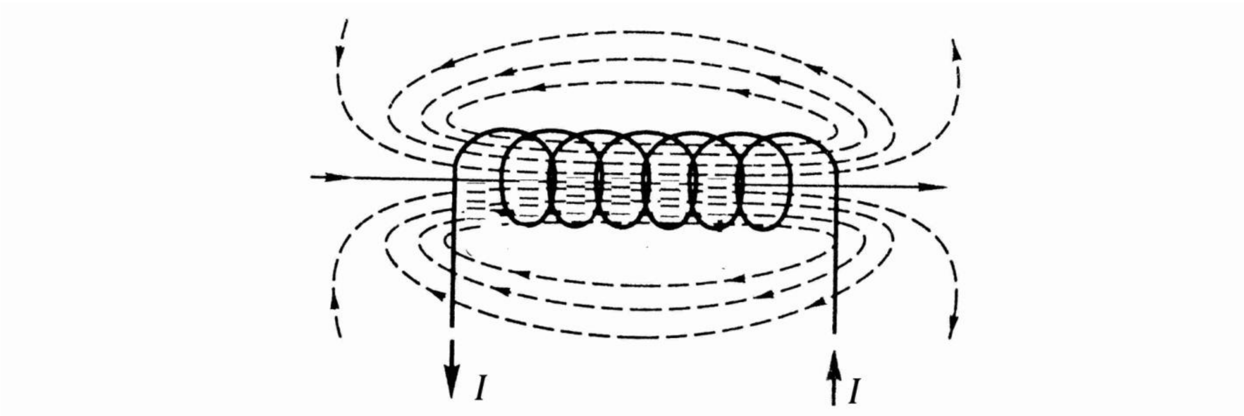


Рис. 37

II.3.6. Электромагнитная индукция – явление возникновения электрического тока в замкнутом проводнике при изменении потока магнитной индукции, проходящего через этот контур. Соответствующий ток называется индукционным.

Основные законы

II.3.7. Принцип суперпозиций магнитных полей: магнитные поля действуют независимо, поэтому вектор магнитной индукции результирующего поля равен векторной сумме магнитных индукций полей, создаваемых каждым током в отдельности:

$$\vec{B} = \sum_{i=1}^{n} \vec{B}_i. \tag{3.5}$$

Для случая магнитного поля, создаваемого проводником с током

$$\vec{B} = \int_l d\vec{B}\,, \tag{3.6}$$

где $d\vec{B}$ – магнитная индукция поля, создаваемая током I, текущем в отрезке проводника dl.

II.3.8. Закон Био-Савара-Лапласа: индукция магнитного поля, создаваемого током I, текущем по отрезку (элементу) проводника dl определяется по формуле

$$dB = \frac{\mu_0\mu}{4\pi}\frac{I\,dl\sin\alpha}{r^2}, \tag{3.7}$$

где r – расстояние от dl до точки поля, α – угол между направлением тока и радиус-вектором точки ($\vec{r}$).

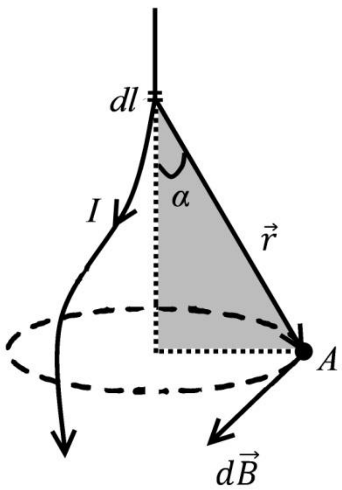


Рис. 38

Для проводников правильной геометрической формы на основании (4) и (5) получены формулы расчета модуля индукции магнитного поля:

a) магнитное поле прямого тока:

$$B = \frac{\mu_0\mu}{2\pi}\frac{I}{r}, \tag{3.8}$$

где r – расстояние от проводника до точки поля;

b) магнитное поле, создаваемое отрезком провода (обозначения ясны из рисунка):

$$B = \frac{\mu_0\mu I}{4\pi r_0}(\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2)\,, \tag{3.9}$$

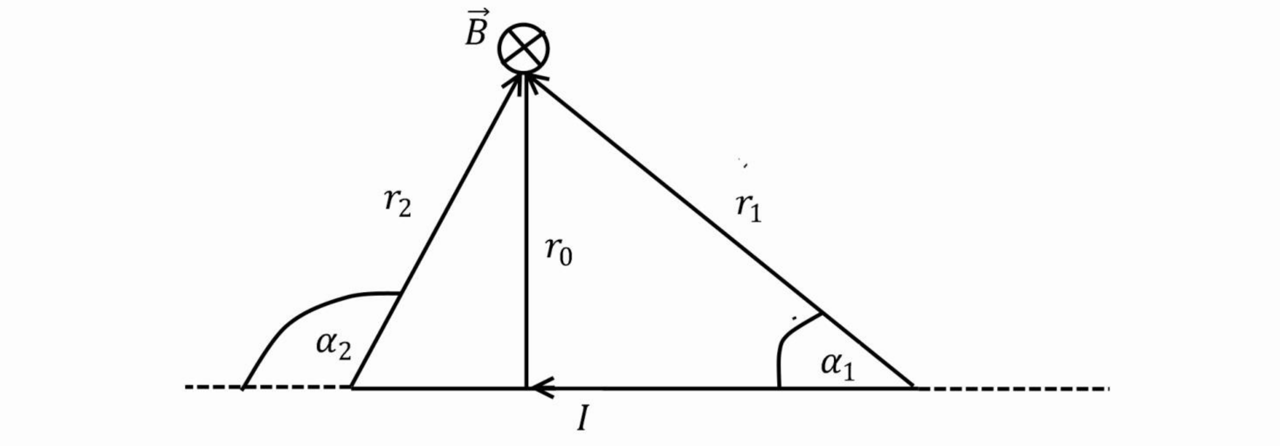


Рис. 39

c) магнитное поле в центре кругового проводника с током:

$$B = \mu_0 \mu \, \frac{I}{2R} \,, \tag{3.10}$$

где R – радиус контура.

d) магнитное поле на оси кругового тока:

$$B = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{2\pi R^2 I}{(R^2 + h^2)^{3/2}} \,, \tag{3.11}$$

где h - расстояние от центра витка до точки, в которой определяется магнитная индукция.

II.3.9. Закон Ампера: модуль силы, действующей на элемент тока ($I \cdot dl$) со стороны внешнего магнитного поля, равен

$$dF_A = I \, dl \, B \sin \alpha \,, \tag{3.12}$$

где α – угол между направлением тока I и вектором магнитной индукции $\vec{B}$.

Для однородного магнитного поля ($\vec{B} = const$)

$$F_A = I \cdot B \cdot l \cdot sin\alpha \,, \tag{3.13}$$

где l – длина отрезка проводника, находящегося в магнитном поле.

Направление силы Ампера определяется с помощью правила левой руки:

a) ладонь левой руки расположить навстречу $\vec{B}$,

b) четыре вытянутых пальца – по направлению тока в проводнике,

c) отогнутый на 90° большой палец покажет направление силы $\vec{F}_A$.

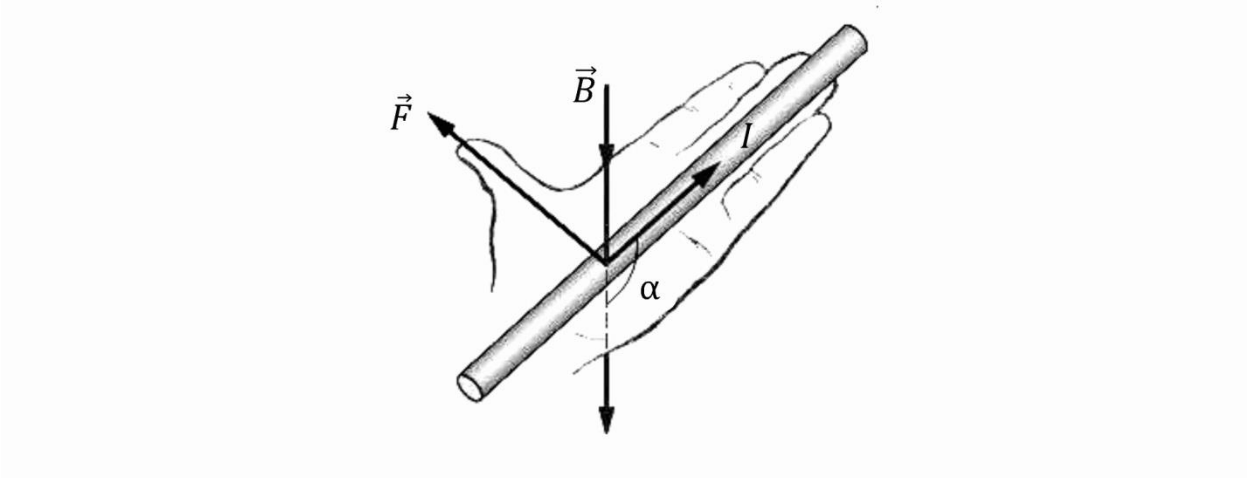


Рис. 40

II.3.10. Сила Лоренца: модуль силы, действующей на электрический заряд q, движущийся со скоростью $\vec{v}$ во внешнем магнитном поле, равен

$$F_л = q\, v\, B \sin\alpha\,, \tag{3.14}$$

где α – угол между $\vec{v}$ и $\vec{B}$. Направление $\vec{F}_л$, действующей на $q > 0$, определяется с помощью правила левой руки:

a) ладонь левой руки расположить навстречу вектору $\vec{B}$,
b) четыре вытянутых пальца направить вдоль $\vec{v}$,
c) отогнутый на 90° большой палец покажет направление силы $\vec{F}_л$.

Примечание: если $q < 0$, то полученное направление $\vec{F}_л$ следует изменить на противоположное.

II.3.11. Работа по перемещению проводника с током в магнитном поле:

$$dA = F_A \cdot dx = IBldx = IBdS = I \cdot d\Phi_B, \tag{3.15}$$

где l - длина проводника, $l \cdot dx = dS$ - площадь, пересекаемая проводником, $BdS = d\Phi_B$ - поток вектора магнитной индукции через эту площадь. Работа, совершаемая при перемещении проводника с током в магнитном поле, равна произведению силы тока на магнитный поток сквозь поверхность, описываемую проводником при его движении.

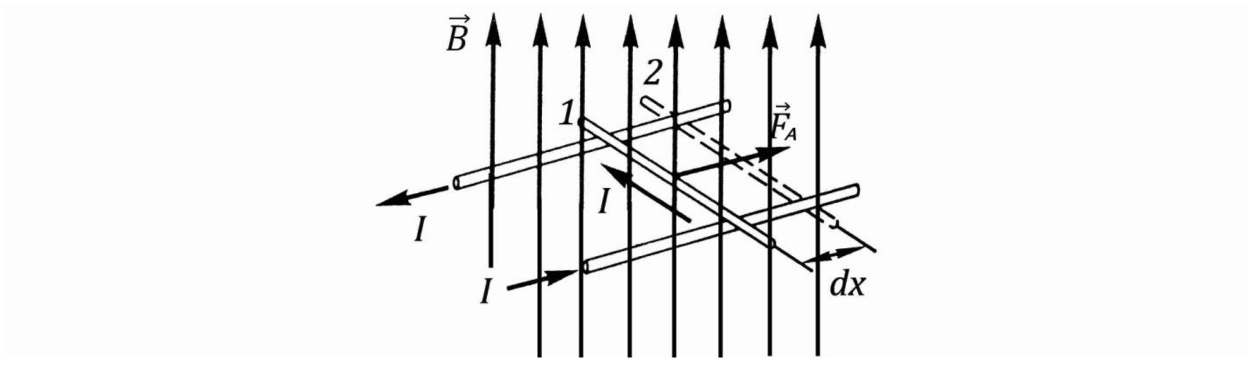


Рис. 41

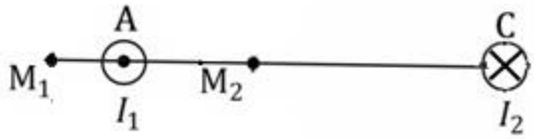
II.3.12. Закон Фарадея: электродвижущая сила электромагнитной индукции (ЭДС индукции) (ε_i), возникающая в замкнутом проводящем контуре, численно равна скорости изменения магнитного потока сквозь поверхность, ограниченную этим контуром:

$$\varepsilon_i = -\frac{d\Phi_B}{dt}. \tag{3.16}$$

Примечание : Если проводник разомкнут, то на его концах возникает соответствующая разность потенциалов

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{d\Phi_B}{dt}. \tag{3.17}$$

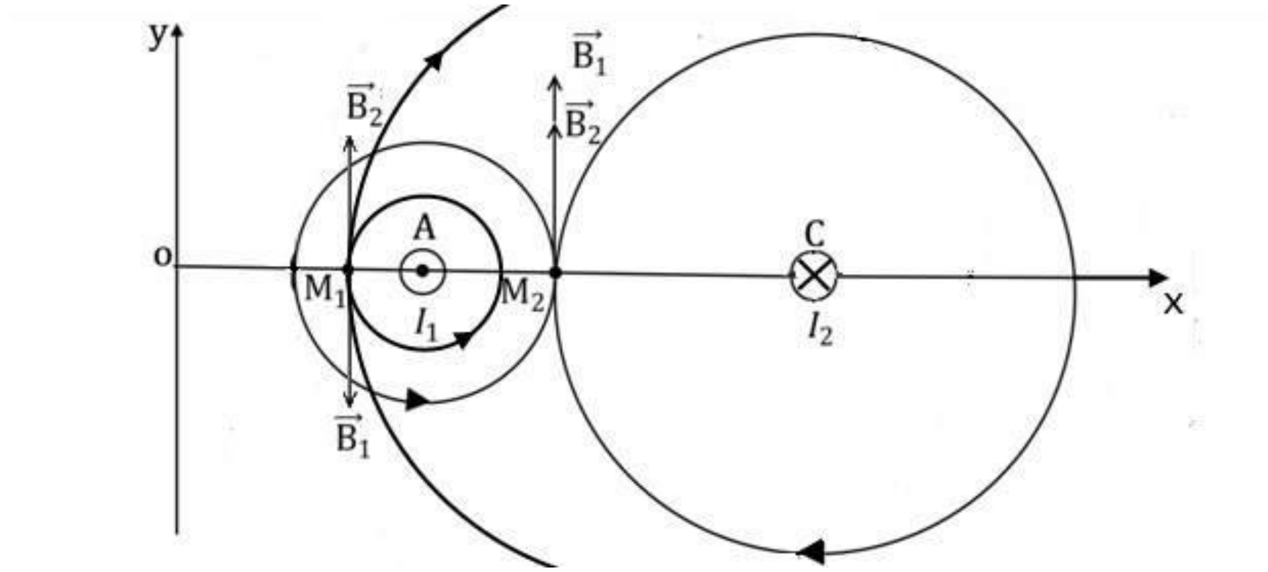
Пример 4. На рисунке изображены сечения прямолинейных бесконечно длинных проводников с токами. Расстояние между проводниками $AC = 10$ см, токи $I_1 = 20$А и $I_2 = 30$А. Найти индукцию магнитного поля в точках M_1и M_2. Расстояние $\mathrm{M}_1\mathrm{A} = 2$см, $\mathrm{M}_2\mathrm{A} = 4$см.



Дано	Решение:
AC=10см=0,1м $I_1 = 20$А $I_2 = 30$А $\mathrm{M}_1\mathrm{A} = 2\text{см} = 2\cdot10^{-2}$м $\mathrm{M}_2\mathrm{A} = 4\text{см} = 4\cdot10^{-2}$м	По закону Био-Савара-Лапласа индукция магнитного поля, создаваемого бесконечно длинным прямолинейным проводником $$B = \frac{\mu_0\mu I}{2\pi r}, \tag{1}$$
$\vec{B}_{M_1}, \vec{B}_{M_2}$?	где $\mu_0 = 4\pi\cdot10^{-7}\ \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$ - магнитная постоянная

(табл.), $\mu \approx 1$ (воздух), r - расстояние от проводника до точки.

По правилу правого винта линии магнитной индукции тока I_1 направлены против часовой стрелки, а I_2 - по часовой стрелке. Векторы $\vec{B}$ направлены по касательной к линиям магнитной индукции.



По принципу суперпозиции магнитных полей $\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2$.

В проекции на ось oy:

$$B_{M_1} = B_2 - B_1\ , \tag{2}$$

$$B_{M_2} = B_1 + B_2\ . \tag{3}$$

Из (1) и (2)

$$B_{M_1} = \frac{\mu_0 I_2}{2\pi r_2} - \frac{\mu_0 I_1}{2\pi r_1} = \frac{\mu_0}{2\pi}\left(\frac{I_2}{r_2} - \frac{I_1}{r_1}\right) = \frac{\mu_0}{2\pi}\left(\frac{I_2}{AC + M_1A} - \frac{I_1}{M_1A}\right).$$

Произведем вычисления:

$$B_{M_1} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi}\left(\frac{30}{10 \cdot 10^{-2} + 2 \cdot 10^{-2}} - \frac{20}{2 \cdot 10^{-2}}\right) = -150\ (\text{мкТл})\ .$$

Знак « $-$ » означает, что $\vec{B}_{M_1}$ направлен вниз, т.е. $\vec{B}_{M_1} \uparrow\uparrow \vec{B}_1$

$$B_{M_1} = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi r_3} + \frac{\mu_0 I_2}{2\pi r_4} = \frac{\mu_0}{2\pi}\left(\frac{I_1}{r_3} + \frac{I_2}{r_4}\right) = \frac{\mu_0}{2\pi}\left(\frac{I_1}{M_2A} + \frac{I_2}{AC - M_2A}\right).$$

Произведем вычисления:

$$B_{M_1} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi}\left(\frac{20}{4 \cdot 10^{-2}} + \frac{30}{10 \cdot 10^{-2} - 4 \cdot 10^{-2}}\right) = 200\ (\text{мкТл})\ .$$

Положительное значение показывает, что $\vec{B}_{M_2}$ направлен вверх.

<u>Приложение.</u> Проекция вектора – см. “Приложение” №10.

<u>Пример 5.</u> Протон, прошедший ускоряющею разность потенциалов 600 В, влетает в однородное магнитное поле с индукцией 0,3 Тл и начинает двигаться по окружности. Вычислить радиус этой окружности.

Дано	Решение
протон $U = 600\text{В}$ $B = 0{,}3\text{Тл}$	Разность потенциалов (напряжение) – характеристика электрического поля, которое, совершая работу сообщает протону кинетическую энергию (ускоряет). Работа – мера
R –?	

изменения энергии: $A = \Delta T$ (1); $\Delta T = T_2 - T_1$ – изменение кинетической энергии заряда. Если считать начальную скорость протона $\upsilon_1 = 0$, то

$$\Delta T = T_2 = \frac{m\upsilon^2}{2}. \tag{2}$$

Работа электрического поля определяется по формуле

$$A = q \cdot (\varphi_1 - \varphi_2) = q \cdot U. \tag{3}$$

Из (1) − (3) $q \cdot U = \dfrac{m\upsilon^2}{2}$, т.е. скорость, с которой протон влетает в магнитное поле

$$\upsilon = \sqrt{\frac{2qU}{m}}. \tag{4}$$

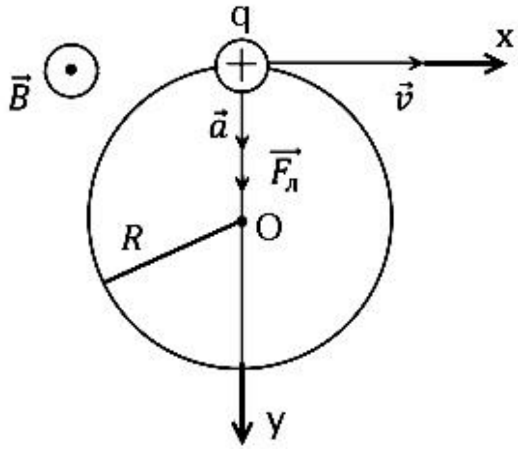
Со стороны магнитного поля на заряд действует сила Лоренца:

$F_л = q\upsilon B \sin\alpha,$ где α - угол между направлением $\vec{\upsilon}$ и $\vec{B}$.

Частица будет двигаться по окружности только при условии $\vec{\upsilon} \perp \vec{B}$ $(\alpha = 90^0)$, т.е.

$$F_л = q\upsilon B. \tag{5}$$

Направление $\vec{F}_Л$ определяется по правилу левой руки (протон – элементарный положительный заряд).



По 2^{му} закону Ньютона сила сообщает телу ускорение $\vec{a} = \dfrac{\vec{F}}{m}$, (6)

сонаправленное с силой: $\vec{a} \uparrow\uparrow \vec{F}$, т.е. $\vec{a} \perp \perp \vec{\upsilon}$ – такое ускорение называется нормальным (a_n) и модуль

$$a_n = \frac{\upsilon^2}{R}. \tag{7}$$

Из (6) в проекции на ось y:

$$F = ma. \tag{8}$$

Из (5), (7), (8) $$qvB = \frac{mv^2}{R}, \text{ отсюда } R = \frac{mv}{qB}. \tag{9}$$

Из (4) и (9) $$R = \frac{m\sqrt{\frac{2qU}{m}}}{qB} = \frac{1}{B}\sqrt{\frac{2mu}{q}}. \tag{10}$$

Масса протона $m = 1{,}67 \cdot 10^{-27}$ кг (табл.),

заряд протона $q = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$Кл (табл.).

Произведем вычисления:

$$R = \frac{1}{0{,}3}\sqrt{\frac{2 \cdot 1{,}67 \cdot 10^{-27} \cdot 600}{1{,}6 \cdot 10^{-19}}} = 0{,}0118 \text{ (м)}.$$

Приложение:

1) тригонометрические функции – см. “Приложение” № 9,
2) проекция вектора – см. “Приложение” № 10,
3) сила Лоренца всегда направлена перпендикулярно скорости, поэтому не может изменить величину скорости, т.е. тангенциальное ускорение $a_\tau = 0$.

Пример 6. Проволочный виток равномерно вращается с частотой ν относительно оси, совпадающей с диаметром витка и перпендикулярной линиям магнитной индукции однородного магнитного поля с индукцией $\vec{B}$. Определить мгновенное значение ЭДС индукции для тех моментов времени, когда плоскость витка составляет угол β с линиями поля. Площадь витка равна S.

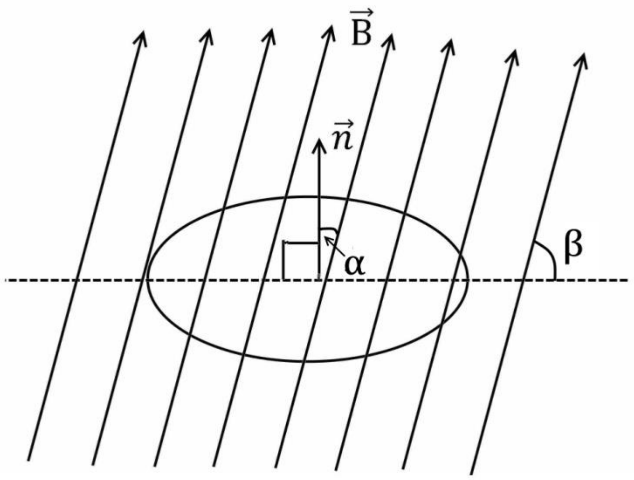
Дано:
$v, \vec{B}, \beta, S$
$\varepsilon - ?$

Решение:

При вращении витка в магнитном поле изменяется магнитный поток, пронизывающий виток. Для однородного магнитного поля магнитный поток

$$\Phi_B = B \cdot S \cdot \cos\alpha, \tag{1}$$

где B – магнитная индукция, S – площадь витка, α – угол между $\vec{B}$ и нормалью к плоскости витка.



Угол α изменяется при равномерном вращении: $\alpha = \omega \cdot t$ (2)
где ω – угловая скорость, t – время. Мгновенное значение ЭДС индукции определяется законом Фарадея:

$$\varepsilon_i = -\frac{d\Phi_B}{dt}, \tag{3}$$

Из (1) − (3)

$$\varepsilon_i = -\frac{d}{dt}(B \cdot S \cdot \cos\omega t) = B \cdot S \cdot \omega \cdot \sin \omega t\,. \tag{4}$$

Угловая скорость связана с частотой вращения: $\omega = 2\pi \cdot \nu$, (5)
где $\pi = 3{,}14$ (табл). Угол, заданный в условии задачи, связан с углом α соотношением

$$\alpha = \frac{\pi}{2} - \beta \tag{6}$$

Из (4) − (6) $\varepsilon_i = B \cdot S \cdot 2\pi\nu \sin\left(\frac{\pi}{2} - \beta\right) = 2\pi\nu\, B\, S \cos\beta$. – Рабочая формула.

<u>Приложение:</u>

1) Производная $\frac{d}{dx}(\cos ax) = -a\ \sin ax$.

2) $\sin(\frac{\pi}{2} - \alpha) = \cos\alpha$.

Задачи для самостоятельного решения

Порядок выполнения контрольной работы

10. Внимательно прочитайте соответствующие разделы учебного пособия.
11. Прочитайте соответствующий материал по учебнику.
12. После усвоения теоретических положений рассмотрите примеры решения задач в пособии.
13. Внимательно прочитайте условие задачи, запишите краткое условие («Дано»), переведите единицы измерения в СИ.
14. Сделайте к задаче поясняющий рисунок.
15. Опираясь на математические формулы для основных понятий и законов, получите рабочую (конечную) формулу.
16. При необходимости найдите в справочнике значение постоянных величин.
17. Подставив в конечную формулу числовые значения, произведите расчеты.
18. Запишите ответ с указанием единиц измерения.

Таблица вариантов

Номер варианта определяется последней цифрой шифра

Вариант	Номера задач					
1	1	11	21	31	41	51
2	2	12	22	32	42	52
3	3	13	23	33	43	53
4	4	14	24	34	44	54
5	5	15	25	35	45	55
6	6	16	26	36	46	56
7	7	17	27	37	47	57
8	8	18	28	38	48	58
9	9	19	29	39	49	59
0	10	20	30	40	50	60

Рекомендации: для решения задач № 1-10 прочитайте в части II раздел I и рассмотрите пример № 1.

1. Определить напряженность поля в точке, расположенной на прямой, соединяющей заряды $q_1 = 10$ нКл и $q_2 = -8$ нКл, и находящейся на расстоянии $r = 8$ см от отрицательного заряда. Расстояние между зарядами 20 см.

2. Расстояние между зарядами $q = \pm 2$ нКл равно $l = 20$ см. Определить напряжённость электростатического поля, созданного этими зарядами в точке, находящейся на расстоянии $r_1 = 16$ см от первого и $r_2 = 12$ см от второго заряда.

3. В вершинах квадрата находятся одинаковые положительные заряды $q = 1$ нКл. Определить напряженность электростатического поля в центре квадрата.

4. В вершинах квадрата находятся одинаковые отрицательные заряды $|q| = 0{,}4$ мкКл. Определить напряженность электростатического поля в середине одной из сторон квадрата. Сторона квадрата равна $a = 5$ см.

5. Две параллельные плоскости одноименно заряжены с поверхностной плотностью зарядов $\sigma_1 = 2$ нКл/м^2 и $\sigma_2 = 4$ нКл/м^2. Определить напряженность электростатического поля между плоскостями.

6. Две параллельные плоскости одноименно заряжены с поверхностной плотностью зарядов $\sigma_1 = 0{,}5$ мкКл/м^2 и $\sigma_2 = 1{,}5$ мкКл/м^2. Определить напряженность электростатического поля вне плоскостей.

7. Две бесконечно длинные равномерно заряженные нити с линейной плотностью зарядов $\tau_1 = 6 \cdot 10^{-8}$ Кл/м и $\tau_2 = -3 \cdot 10^{-9}$ Кл/м расположены параллельно на расстоянии $r = 12$ см друг от друга. На каком расстоянии от первой нити результирующая напряженность электростатического поля равна нулю?

8. Расстояние между двумя параллельно расположенными бесконечно длинными нитями $r = 10$ см. Одна нить заряжена с линейной плотностью $\tau_1 = 10$ мкКл/м, другая – $\tau_2 = -5$ мкКл/м. Найти напряженность электростатического поля в точке, удаленной на расстояние 10 см от каждой нити.

9. Два заряд $q_1 = 20$ нКл и $q_2 = -10$ нКл находятся на расстоянии 40 см друг от друга. Найти положение точки на прямой, проходящей через эти заряды. Напряженность электрического поля в которой равна нулю.

10. Две параллельные плоскости одноименно заряжены с поверхностной плотностью зарядов $\sigma_1 = -0{,}4$ мкКл/м^2 и $\sigma_2 = 1$ мкКл/м^2. Определить напряженность электростатического поля вне плоскостей.

<u>Рекомендации:</u> для решения задач № 11-20 прочитайте в части II раздел I и рассмотрите пример № 2.

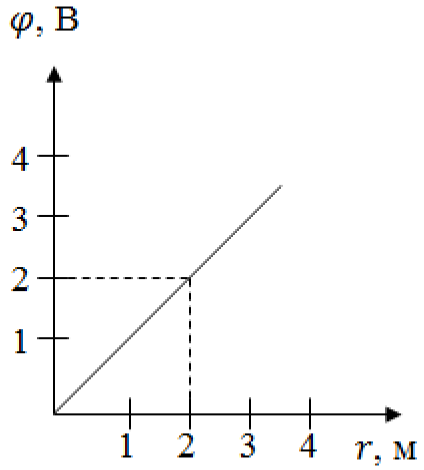
11. С поверхности бесконечного равномерно заряженного цилиндра вылетает α - частица. Определить кинетическую энергию α - частицы в точке

поля, находящейся на расстоянии $8R$ от поверхности цилиндра (α - частица состоит из двух протонов).

12. Электрическое поле образовано бесконечно длинной заряженной нитью, линейная плотность заряда которой $\tau = 20$ нКл/м. Определить работу, совершаемую этим полем при перемещении электрона из точки, отстоящей на расстоянии 12 см, в точку на расстоянии 8 см от нити.

13. Электрон, пройдя в плоском конденсаторе путь от одной пластины до другой, приобрёл скорость 10^5 м/с. Расстояние между пластинами $d = 8$ мм. Найти разность потенциалов между пластинами и поверхностную плотность заряда на пластинах.

14. На рисунке изображена зависимость потенциала электростатического поля от расстояния. Определить напряженность этого поля и работу по перемещению заряда $q = 1$мкКл из точки $r_1 = 2$ см до точки $r_2 = 10$ см.



15. Какая совершается работа при перемещении точечного заряда $2 \cdot 10^{-8}$ Кл из бесконечности в точку, находящуюся на расстоянии 1см от поверхности шара радиусом 1 см с поверхностной плотностью заряда $\sigma = 10^{-9}$ Кл/см^2.

16. На расстоянии 4 см от бесконечно длинной заряженной нити находится точечный заряд 2/3 нКл. Под действием поля заряд перемещается до расстояния 2 см, при этом совершается работа А = 5 мкДж. Найти линейную плотность и знак заряда нити.

17. Электрическое поле образовано бесконечной нитью с линейной плотностью заряда $2 \cdot 10^{-9}$ Кл/см. Какую скорость получит электрон, приблизившись к нити с расстояния 1 см до расстояния 0,5 см?

18. Электрическое поле образовано бесконечно длинной заряженной нитью, линейная плотность заряда которой $\tau = 10$ нКл/м. Определить работу, совершаемую этим полем при перемещении электрона из точки, отстоящей на расстоянии 10 см, в точку на расстоянии 2 см от нити.

19. На расстоянии 5 см от бесконечно длинной заряженной нити находится точечный заряд 1 нКл. Под действием поля заряд перемещается до расстояния 1 см; при этом совершается работа А = 9 мкДж. Найти линейную плотность и знак заряда нити.

20. Электрическое поле образовано бесконечной нитью с линейной плотностью заряда 0,2 мкКл/м. Какую скорость получит электрон, приблизившись к нити с расстояния 2 см до расстояния 1 см?

<u>Рекомендации:</u> для решения задач № 21-30 прочитайте в части II раздел II и рассмотрите пример № 3.

21. Электродвигатель вакуумного насоса с сопротивлением обмоток 2 Ом подключен к генератору с ЭДС 20 В и внутренним сопротивление 4 Ом. При работе мотора через его обмотки проходит ток силой 10 А. Найти КПД электродвигателя. Сопротивлением подводящих проводов пренебречь.

22. К зажимам батареи аккумуляторов присоединен нагреватель. ЭДС батареи равно 24 В, внутреннее сопротивление 1 Ом. Нагреватель, включенный в цепь, потребляет мощность 80 Вт. Найти силу тока в цепи и КПД нагревателя.

23. Батарея с ЭДС 240 В и внутренним сопротивлением 1 Ом замкнута на внешнее сопротивление 23 Ом. Найти полную мощность, полезную мощность и КПД батареи.

24. Во сколько раз КПД линии электропередачи с напряжением 200 кВ больше КПД линии электропередачи с напряжением 100 кВ, если сопротивление линии 400 Ом, а передаваемая мощность 10МВт?

25. Электромотор с сопротивление 2 Ом подключен к генератору с ЭДС 240 В и внутренним сопротивлением 4 Ом. При работе мотора через его обмотки проходит ток 10 А. Определить КПД электродвигателя.

26. ЭДС аккумулятора 12 В. При силе тока 3 А его КПД равен 0,8. Определить внутреннее сопротивление аккумулятора.

27. ЭДС батареи равно 20 В. Сопротивление внешней цепи равно 2 Ом, сила тока 4 А. Найти КПД батареи. При каком значении внешнего сопротивления КПД будет равен 99%?

28. При включении электромотора в сеть напряжением 220 В он потребляет ток 5 А. Определить мощность, потребляемую мотором, и его КПД, если сопротивление обмотки мотора равно 6 Ом.

29. Источник тока с ЭДС 1,6 В имеет внутреннее сопротивление 0,5 Ом. Найти КПД источника при токе в цени 2,4 А.

30. Электроэнергия генератора передается потребителю по проводам, имеющим сопротивление 200 Ом. КПД линии передачи равен 0,9. Найти сопротивление нагрузки. Внутренним сопротивлением генератора пренебречь.

Рекомендации: для решения задач № 31-40 прочитайте в части II раздел III и рассмотрите пример № 4.

31. По двум бесконечно длинным прямолинейным проводникам, расположенным параллельно друг другу на расстоянии 10 см, текут токи силой 5 А и 10 А в одном направлении. Определить магнитную индукцию $\vec{B}$ поля в точке, удаленной на 10 см от каждого проводника.

32. По кольцевому проводнику радиусом 10 см течет ток силой 4 А. Параллельно его плоскости на расстоянии 2 см над центром проходит бесконечно длинный прямолинейный проводник с током силой 2 А. Определить индукцию и напряженность магнитного поля в центре кольца.

33. По круговому проводнику радиусом 12 см течет ток силой 2 А. Перпендикулярно его плоскости на расстоянии 10 см от его центра проходит бесконечно длинный прямолинейный проводник с током силой 5 А. Определить магнитную индукцию поля в центре кругового проводника.

34. По двум бесконечно длинным параллельным проводникам текут токи 8 А и 12 А одинакового направления, расстояние между проводниками 32 см. Определить индукцию и напряженность магнитного поля в точке, лежащей посередине между проводниками.

35. Два прямолинейных бесконечно длинных проводника скрещены под прямым углом. По проводникам текут токи 8 А и 6 А. Расстояние между проводниками 10 см. Определить магнитную индукцию поля в точке, одинаково удаленной от обоих проводников.

36. Бесконечно длинный проводник с током 5 А образует круговую петлю, касательную к проводу. Найти радиус петли, если известно, что напряженность магнитного поля в центре петли 41 А/м.

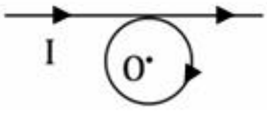


Рис. 42

37. Два бесконечно длинных проводника и круговой виток расположены так, как это показано на рисунке. Токи в проводниках $I_1 = I_2 = I_3 = 1$ А. Радиус витка 2 см. Расстояния $r_1 = r_2 = 5$ см. Определить индукцию магнитного поля в точке О.

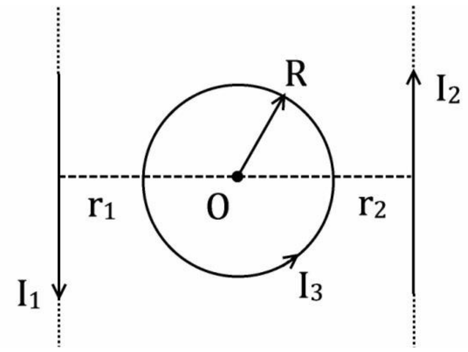


Рис. 43

38. Четыре бесконечно длинных проводника с токами $I_1 = I_2 = I_3 = I_4 = 1$ А расположены в вершинах квадрата так, как это показано на рисунке. Сторона квадрата 5 см. Определить индукцию магнитного поля в точке А, расположенной в центре квадрата.

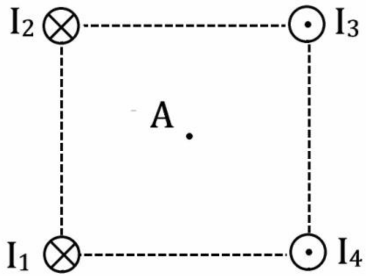


Рис. 44

39. Три бесконечно длинных проводника с токами $I_1 = I_2 = I_3 = 0{,}5$ А расположены так, как это показано на рисунке. Расстояния $r_1 = r_2 = {}^{r_3}/_2 =$ 2 см. Определить индукцию магнитного поля в точке А.

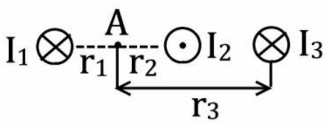


Рис. 45

40. По кольцевому проводнику радиусом 20 см течет ток силой 3 А. Параллельно его плоскости на расстоянии 4 см над центром проходит бесконечно длинный прямолинейный проводник с током силой 1 А. Определить индукцию и напряженность магнитного поля в центре кольца.

<u>Рекомендации:</u> для решения задач № 41-50 прочитайте в части II раздел III и рассмотрите пример № 5.

41. Электрон, ускоренный разностью потенциалов 1 кВ, влетает в однородное магнитное поле, направление которого перпендикулярно направлению его движения. Индукция магнитного поля 1,19 мТл. Найти радиус траектории движения электрона.

42. Поток $\alpha -$ частиц, ускоренных разность потенциалов 1 МВ, влетает в однородное магнитное поле напряженностью 1,2 кА/м. Скорость частиц перпендикулярна к направлению магнитного поля. Найти силу, действующую на каждую частицу. Направление силы указать на рисунке ($\alpha -$ частица содержит два протона).

43. Электрон влетает в однородное магнитное поле со скоростью $4 \cdot 10^7$ м/с, направленной перпендикулярно линиям индукции магнитного поля. Индукция магнитного поля 1 мТл. Найти тангенциальное и нормальное ускорения электрона.

44. Найти кинетическую энергию протона, движущегося по дуге окружности радиусом 60 см в магнитном поле с индукцией 1 Тл.

45. Протон и электрон, ускоренные одинаковой разностью потенциалов, влетают в однородное магнитное поле. Во сколько раз радиус кривизны траектории протона больше радиуса кривизны траектории электрона?

46. Заряженная частица движется в магнитном поле по окружности со скоростью 10^6 м/с. Индукция магнитного поля 0,3 Тл. Радиус окружности 4 см. Найти заряд частицы, если известно, что ее энергия $19{,}2 \cdot 10^{-19}$ Дж.

47. Найти отношение заряда частицы к ее массе, если она, влетая со скоростью 10^6 м/с в однородное магнитное поле напряженностью 200 кА/м, движется по дуге окружности радиусом 8,3 см. Направление скорости движения частицы перпендикулярно к направлению индукции магнитного поля.

48. Электрическое поле с разностью потенциалов 1 кВ ускоряет электрон, который затем влетает в однородное магнитное поле ($B = 1{,}2$ мТл) перпендикулярно линиям индукции. Найти период обращения электрона.

49. Найти кинетическую энергию протона, движущегося по дуге окружности радиусом 0,5 м в магнитном поле с индукцией 1 Тл.

50. Поток $\alpha -$частиц, ускоренных разность потенциалов 0,8 МВ, влетает в однородное магнитное поле напряженностью 1 кА/м. Скорость частиц перпендикулярна к направлению магнитного поля. Найти силу, действующую на каждую частицу. Направление силы указать на рисунке. ($\alpha -$частица содержит два протона).

Рекомендации: для решения задач № 51-60 прочитайте в части II раздел III и рассмотрите пример № 6.

51. Рамка площадью 50 см^2, содержащая 200 витков тонкого провода, может свободно вращаться относительно оси, лежащей в плоскости рамки. Ось вращения перпендикулярна линиям магнитной индукции однородного

магнитного поля ($B = 0{,}05$ Тл). Определить максимальную ЭДС индукции, которая возникает в рамке при её вращении с частотой 40 с^{-1}.

52. Найти разность потенциалов на концах оси автомобиля, возникающую при движении его со скоростью 80 км/ч, если длина оси 1,5 м, а вертикальная составляющая магнитного поля Земли $5 \cdot 10^{-5}$ Тл.

53. В однородном магнитном поле с индукцией 1 Тл равномерно вращается стержень с угловой скоростью 1 рад/с. Длина стержня равна 1 м. Определить разность потенциалов, возникающую на концах стержня.

54. Какую длину активной части должен иметь проводник, чтобы при перемещении его со скоростью 15 м/с перпендикулярно линиям индукции однородного магнитного поля ($\text{B} = 0{,}4$ Тл) в нем возникла разность потенциалов 3 В?

55. Найти разность потенциалов на концах проводника длиной 0,25 м, перемещающегося в однородном магнитном поле с индукцией 8 мТл со скоростью 5 м/с под углом 60° к вектору магнитной индукции.

56. Под каким углом к магнитным силовым линиям должен двигаться проводник длиной 2 м, чтобы при скорости движения 1,8 км/ч в однородном магнитном поле с индукцией 0,5 Тл на его концах индуцировалась разность потенциалов 0,35 В?

57. Из провода длиной 2 м сделали квадрат и поместили его под углом 60° к линиям магнитной индукции. Определить ЭДС индукции, возникающую в контуре, если магнитная индукция поля изменяется по закону $B = 16\,t$ (Тл), где t – время.

58. Рамка площадью 20 см^2, содержащая 50 витков тонкого провода, может свободно вращаться относительно оси, лежащей в плоскости рамки. Ось вращения перпендикулярна линиям магнитной индукции однородного магнитного поля ($B = 0{,}04$ Тл). Определить максимальную ЭДС индукции, которая возникает в рамке при её вращении с частотой 20 с^{-1}.

59. Круглый проволочный виток площадью 0,01 м^2 находится в однородном магнитном поле, индукция которого 1 Тл. Плоскость витка перпендикулярна к направлению магнитного поля. Найти среднюю ЭДС индукции, возникающую в витке при выключении поля в течении времени 10 мс.

60. Горизонтальный стержень длиной 1 м вращается вокруг вертикальной оси, проходящей через один из его концов. Плоскость вращения стержня перпендикулярна линиям индукции однородного магнитного поля ($B = 50$ мкТл). При какой частоте вращения стержня разность потенциалов на его концах равна 1 мВ?

Табличные данные

I. Физические постоянные (приблизительные значения)

Элементарный заряд	$e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл
Электрическая постоянная	$\varepsilon_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м
Магнитная постоянная	$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м
Масса электрона	$m_e = 9{,}11 \cdot 10^{-31}$ кг
Масса протона	$m_p = 1{,}672 \cdot 10^{-27}$ кг

II. Основные единицы системы СИ

	Единицы	
	название	Обозначение
Длина	метр	м
Масса	килограмм	кг
Время	секунда	с
Сила электрического тока	ампер	А

III. Единицы механических и электромагнитных величин

<table>
<tr><th>Величина</th><th>Обозначение</th><th>Наименование</th><th>Обозначение</th></tr>
<tr><td>Сила</td><td>F</td><td>ньютон</td><td>H</td></tr>
<tr><td>Работа, энергия, теплота</td><td>Q</td><td>джоуль</td><td>Дж</td></tr>
<tr><td>Мощность</td><td>N</td><td>ватт</td><td>Вт</td></tr>
<tr><td>Электрический заряд</td><td>q</td><td>кулон</td><td>Кл</td></tr>
<tr><td>Напряженность электрического поля</td><td>E</td><td>вольт на метр</td><td>В/м</td></tr>
<tr><td>Электрическое сопротивление</td><td>R</td><td>ом</td><td>Ом</td></tr>
<tr><td>Магнитная индукция</td><td>B</td><td>тесла</td><td>Тл</td></tr>
<tr><td>Напряженность магнитного поля</td><td>H</td><td>ампер на метр</td><td>А/м</td></tr>
<tr><td>Магнитный поток</td><td>Φ_B</td><td>вебер</td><td>Вб</td></tr>
<tr><td>Электрическое напряжение</td><td>U</td><td rowspan="4">вольт</td><td rowspan="4">В</td></tr>
<tr><td>Электрический потенциал</td><td>φ</td></tr>
<tr><td>Разность потенциалов</td><td>$\varphi_2 - \varphi_1$</td></tr>
<tr><td>Электродвижущая сила</td><td>ε</td></tr>
</table>

ЧАСТЬ III.

Механические и электромагнитные колебания и волны. Элементы физики атома и атомного ядра.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА
МЕХАНИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

Гармонические колебания.

Колебательное движение. Незатухающие свободные колебания. Уравнение гармонических колебаний. Амплитуда, фаза, частота, период колебаний. График гармонических колебаний. Пружинный, математический и физический маятники. Электрический колебательный контур. Дифференциальное уравнение гармонических колебаний. Энергия гармонических колебаний.

Сложение гармонических колебаний.

Векторная диаграмма колебаний. Сложение гармонических колебаний одинакового направления и одинаковой частоты. Сложение гармонических колебаний одинакового направления с близкими частотами. Биения. Частота биений. Сложение взаимноперпендикулярных колебаний. Фигуры Лиссажу.

Затухающие колебания.

Диссипативность реальных колебательных систем. Дифференциальное уравнение затухающих колебаний и его решение. Амплитуда, частота и период затухающих колебаний. Время релаксации. Логарифмический декремент затухания и его физический смысл.

Вынужденные колебания.

Дифференциальное уравнение вынужденных колебаний и его решение. Зависимость амплитуды вынужденных колебаний от частоты. Резонанс. Резонансные кривые.

Упругие волны.

Механизм образования механических волн в сплошной среде. Продольные и поперечные волны. Волновая поверхность. Уравнение плоской гармонической волны. Фаза волны. Длина волны. Волновое число. Фазовая скорость. Одномерное волновое уравнение для однородной изотропной среды. Принцип суперпозиции волн. Когерентные волны. Интерференция волн. Стоячие волны.

Электромагнитные волны.

Плоская электромагнитная волна. Излучение электрического диполя. Диаграмма направленности. Шкала электромагнитных волн. Физические основы радиосвязи, телевидения, космической радиосвязи и радиолокации.

ВОЛНОВАЯ И КВАНТОВАЯ ОПТИКА

Основы геометрической оптики.

Приближение геометрической оптики. Законы прямолинейного распространения, отражения и преломления света. Принцип Ферма. Преломление на сферической поверхности. Тонкая линза. . Оптические инструменты (лупа, фотоаппарат, кинопроектор, микроскоп, зрительная труба и телескоп).

Интерференция света.

Когерентность и монохроматичность световых волн. Оптическая разность хода. Способы наблюдения интерференции света. Опыт Юнга. Интерференция света в тонких пленках. Полосы равного наклона и равной толщины. Кольца Ньютона. Применения интерференции света (просветление оптики, прецизионные измерения малых перемещений, спектральные приборы и др.).

Дифракция света.

Принцип Гюйгенса-Френеля. Зоны Френеля. Дифракция Френеля на круглом отверстии и непрозрачном диске. Дифракция Фраунгофера на щели. Дифракционная решетка. Разрешающая способность дифракционной решетки. Разрешающая сила объектива. Понятие о голографии.

Поляризация света.

Виды поляризации света. Получение и анализ поляризованного света. Поляроиды. Закон Малюса. Отражение и преломление света на границе раздела двух диэлектриков. Формулы Френеля. Полное отражение. Волноводы и световоды. Элементы кристаллооптики. Двойное лучепреломление.

Дисперсия света.

Нормальная и аномальная дисперсии. Основы классической теории дисперсии. Дисперсионные спектральные приборы.

Поглощение света.

Закон Бугера. Селективный характер зависимости коэффициента поглощения от длины волны света.

Тепловое излучение.

Тепловое излучение. Характеристики теплового излучения: испускательная способность, поглощательная способность, энергетическая светимость. Абсолютно черное тело. Серое тело. Закон Кирхгофа. Распределение энергии в спектре абсолютно черного тела. «Ультрафиолетовая катастрофа». Кванты электромагнитного излучения. Формула Планка.

Внешний фотоэффект.

Внешний фотоэффект и его законы. Гипотеза Эйнштейна о фотонах, уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта. Фотоэлементы.

Давление света.

Масса и импульс фотона. Давление света.

Теория атома водорода по Бору.

Опыт Резерфорда по рассеянию α - частиц. Ядерная модель атома. Теория Бора для водородоподобных систем. Объяснение спектра излучения атома водорода.

КВАНТОВАЯ ФИЗИКА. ФИЗИКА АТОМА

Корпускулярно-волновой дуализм свойств материи.

Гипотеза де Бройля. Ее экспериментальные подтверждения**.** Статистическое истолкование волн де Бройля. Соотношения неопределенностей.

Уравнение Шредингера.

Физический смысл волновой функции. Стационарное уравнение Шредингера. Решение уравнения Шредингера для простейших одномерных квантовых систем.

Физика атомов и молекул.

Атом водорода в квантовой механике. Главное и орбитальное квантовые числа. Магнитное квантовое число. Спин электрона. Электронные оболочки и слои. Принцип Паули. Распределение электронов в атомах по состояниям. Многоэлектронные атомы. Периодическая система элементов Менделеева. Понятие о спектральном анализе вещества.

Лазеры.

Поглощение. Спонтанное и вынужденное излучение. Инверсная заселенность состояний. Трехуровневая диаграмма лазера. Резонаторы. Особенности лазерного излучения.

Энергетические зоны в твердых телах.

Разрешенные и запрещенные энергетические зоны. Валентная зона и зона проводимости. Внутризонные и межзонные переходы электронов. Металлы, полупроводники и диэлектрики в зонной теории.

Электрические свойства полупроводников.

Собственная проводимость полупроводников. Электронный и дырочный вклады в собственную проводимость. Зависимость собственной проводимости полупроводников от температуры. Примесная проводимость полупроводников. Донорные и акцепторные уровни. Полупроводники p - и n - типа.

ЭЛЕМЕНТЫ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ И ФИЗИКИ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Основные характеристики ядер.

Основные свойства и строение ядра. Характеристики атомных ядер. Разновидности ядер: изотопы, изобары, изомеры. Энергия связи ядра. Удельная энергия связи. Понятие о природе ядерных сил.

Радиоактивность.

Закон радиоактивного распада. Радиоактивные изотопы в природе. Закономерности α, β и γ - распада. Проникающая способность. Естественный фон облучения. Биологическое действие ионизирующих излучений.

Ядерные реакции.

Эффективное сечение реакции. Выход ядерной реакции. Типы ядерных реакций. Ядерные реакции под действием нейтронов. Радиоуглеродный метод определения возраста останков организмов.

Понятие о ядерной энергетике.

Реакция деления ядер. Осколки деления. Размножение нейтронов. Цепная реакция деления ядер урана. Атомный реактор. Проблема управляемых термоядерных реакций.

Элементарные частицы.

Фундаментальные взаимодействия и основные классы элементарных частиц. Частицы и античастицы. Лептоны и адроны. Кварки.

Список литературы

1. Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Высшая школа, 2005, 2007, 557с.
2. Дмитриева В.Ф. Основы физики. М.: Высшая школа, 2003, 527с.
3. Дмитриева В.Ф. Физика. М.: Издательский центр «Академия», 2006, 461 с.
4. Сивухин Д.В. Общий курс физики. М.: Физматлит, 2005, 552 с.
5. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. М.: Высш. шк., 2002, 718 с.

Примечание: в учебниках разных авторов возможны различия в буквенных обозначениях физических величин. В пособии обозначения преимущественно согласуются с учебником Трофимовой Т.И.

I. МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ.

Основные понятия

III.2.1. Колебание – ограниченное движение, повторяющееся во времени (полностью или частично) в окрестности некоторого среднего положения (положения равновесия).

III.2.2. Механическое колебание – колебание, которое характеризуется изменением только механических величин (смещения, скорости, ускорения и т.д.).

III.2.3. Периодические колебания – колебания, в которых каждое значение изменяющейся величины повторяется через одинаковые промежутки времени.

III.2.4. Период колебаний (T) – наименьшее время, за которое повторяется каждое значение изменяющейся величины.

III.2.5. Частота колебаний (ν) – число полных колебаний, совершаемых за единицу времени:

$$\nu = \frac{1}{T}\,. \tag{1.1}$$

III.2.6. Гармоническое колебание – периодическое изменение величины, которое выражается косинусоидальным (или синусоидальным) законом:

$$x = A\cos(\omega t + \varphi), \tag{1.2}$$

где A – амплитуда колебания – величина, равная наибольшему (по модулю) значению изменяющейся величины, $(\omega t + \varphi)$ – фаза гармонического колебания, определяет значение изменяющейся величины в данный момент времени, φ – начальная фаза, ω –циклическая частота:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi \cdot \nu. \tag{1.3}$$

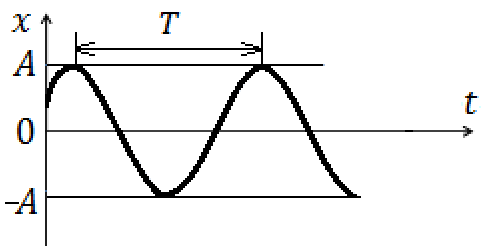


Рис. 46

III.2.7. Векторная диаграмма – графический способ представления гармонического колебания с помощью вектора, численно равного амплитуде колебания, равномерно вращающегося с частотой ω против часовой стрелки вокруг оси O, перпендикулярной к плоскости чертежа. Если в начальный момент времени ($t = 0$) угол между векторами $\vec{A}$ и осью ox равен φ, то проекция этого вектора на ось Ox совершает гармонические колебания по закону (1.2).

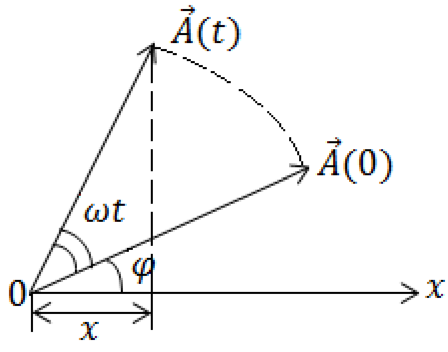


Рис. 47.

Основные законы

III.2.8. Сложение гармонических колебаний одинаковой частоты, происходящих по одной прямой:

$$x_1 = A_1 \cos(\omega t + \varphi_1),$$
$$x_2 = A_2 \cos(\omega t + \varphi_2).$$

По методу векторной диаграммы амплитуда результирующего колебания $\vec{A} = \vec{A}_1 + \vec{A}_2$ (сложение по правилу параллелограмма).

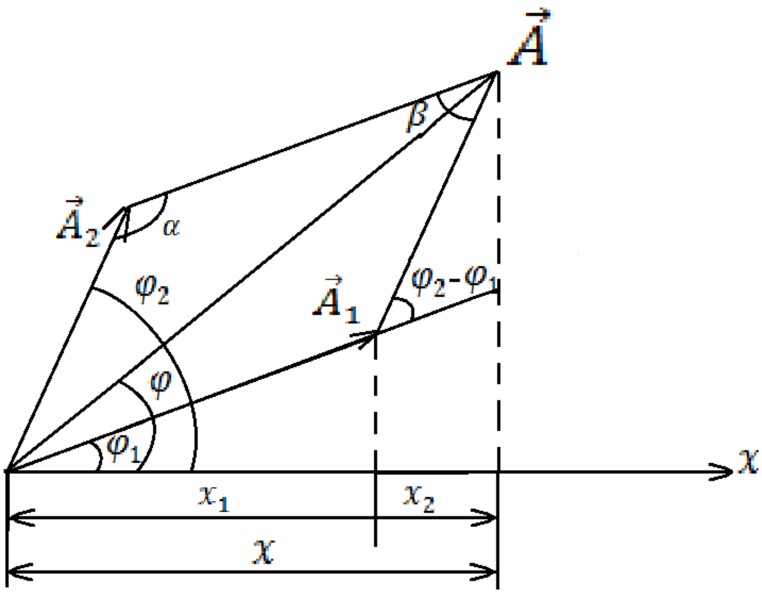


Рис. 48

Все три вектора вращаются с одинаковой угловой скоростью ω, т.е. результирующее значение проекции вектора $\vec{A}$ на ось x:

$$x = x_1 + x_2 = A\,cos(\omega t + \varphi). \qquad (1.4)$$

Из рис. 3 следует (по теореме косинусов):

$$A^2 = {A_1}^2 + {A_2}^2 - 2A_1\,A_2 \cos\alpha;$$

$$\alpha = 180° - \beta;$$

$$\cos(180° - \beta) = -\cos\beta;$$

$$\beta = \varphi_2 - \varphi_1,$$

т.е.

$$A^2 = {A_1}^2 + {A_2}^2 + 2A_1\,A_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1) \qquad (1.5)$$

и

$$tg\,\varphi = \frac{A_1\,sin\varphi_1 + A_2\,sin\varphi_2}{A_1\,cos\varphi_1 + A_2\,cos\varphi_2}. \qquad (1.6)$$

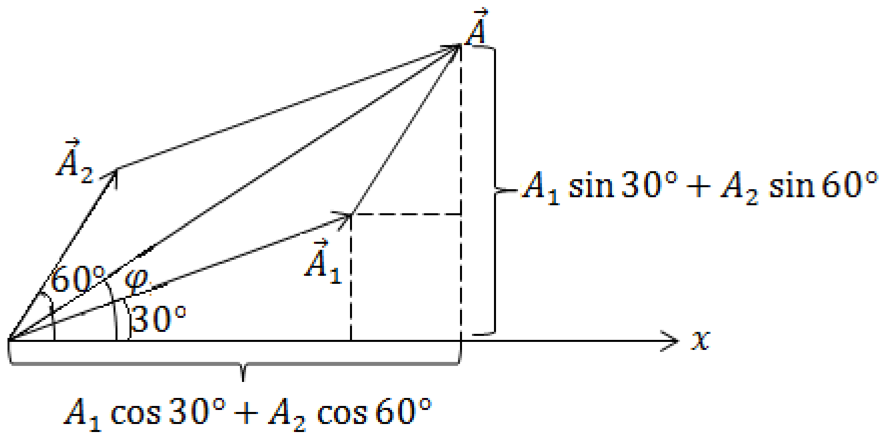
Пример 1. Складываются два одинаково направленных колебания с амплитудами $A_1 = 3$ см и $A_2 = 2$ см, начальными фазами $\varphi_1 = \frac{\pi}{6}$ и $\varphi_2 = \frac{\pi}{3}$. Период колебаний $T = 2$ с. Построить векторную диаграмму сложения этих колебаний и написать уравнение результирующего колебания.

Дано:	Решение.
$A_1 = 3$ см $A_2 = 2$ см $\varphi_1 = \frac{\pi}{6}$ $\varphi_2 = \frac{\pi}{3}$ $T = 2$ с	Запишем уравнения данных колебаний: $x_1 = A_1\cos(\omega t + \varphi_1), \qquad (1)$ $x_2 = A_2\cos(\omega t + \varphi_2), \qquad (2)$ где $\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{2} = \pi$ $с^{-1}$ - циклическая частота колебания, одинаковая для складываемых колебаний.
$x(t)$–?	Из (1) и (2) после подстановки данных получим: $x_1 = 3\cos\left(\pi t + \frac{\pi}{6}\right) = 3\cos(\pi t + 30°), см, \qquad (3)$ $x_2 = 2\cos\left(\pi t + \frac{\pi}{3}\right) = 2\cos(\pi t + 60°),\ см. \qquad (4)$

Для построения векторной диаграммы необходимо фиксировать момент времени; удобно выбрать время $t = 0$. Тогда из (3) и (4)

$$x_1 = 3\cos 30°, см; \quad x_2 = 2\cos 60°, см.$$

Изобразим векторы $\vec{A}_1$ и $\vec{A}_2$. Для этого отложим отрезки длиной $A_1 = 3$ см и $A_2 = 2$ см под углами $\varphi_1 = 30°$ и $\varphi_2 = 60°$ к оси x.



Результирующее колебание будет происходить с той же частотой ω и амплитудой $\vec{A}$, равной геометрической сумме векторов $\vec{A}_1$ и $\vec{A}_2$, т.е. $\vec{A}$ будет диагональю параллелограмма, построенного на $\vec{A}_1$ и $\vec{A}_2$. Согласно теореме косинусов (после преобразований)

$$A^2 = {A_1}^2 + {A_2}^2 + 2\,A_1\,A_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1).$$

$$A = \sqrt{3^2 + 2^2 + 2 \cdot 3 \cdot \cos(60° - 30°)} = 4{,}84 \text{ (см)}.$$

Начальную фазу результирующего колебания можно также определить непосредственно из рисунка:

$$tg\,\varphi = \frac{A_1 \sin 30° + A_2 \sin 60°}{A_1 \cos 30° + A_2 \cos 60°} = \frac{3 \sin 30° + 2 \sin 60°}{3 \cos 30° + 2 \cos 60°} = 0{,}898,$$

т.е. $\varphi = arctg\;0{,}898 = 42°$ или $\varphi = 0{,}735$ рад.

Таким образом, уравнение результирующего колебания будет иметь вид

$$x = 4{,}84 \cos(\pi t + 0{,}735), \text{ см.}$$

Примечание:

1) Сложение векторов – см. “Приложение” №11.
2) Теорема косинусов – см. “Приложение” №12.
3) ? $\sin 30° = 0{,}5$; $\cos 30° = \frac{\sqrt{3}}{2}$; $\sin 60° = \frac{\sqrt{3}}{2}$; $\cos 60° = 0{,}5$.

II. ВОЛНОВАЯ ОПТИКА.

Основные понятия.

III.2.1. <u>Волна</u> – процесс распространения колебаний в пространстве.

III.2.2. <u>Длина волны</u> (λ) – расстояние, на которое распространяется колебание за один период:

$$\lambda = \upsilon \cdot T, \tag{2.1}$$

где υ – скорость распространения колебаний (скорость волны).

III.2.3. <u>Электромагнитные волны</u> – переменное электромагнитное поле, распространяющееся в пространстве с конечной скоростью

$$\upsilon = \frac{c}{n}, \tag{2.2}$$

где c – скорость света в вакууме, n – показатель преломления среды.

<u>Свойства:</u>

1) векторы напряженности электрического и магнитного полей взаимно перпендикулярны: $\vec{E} \perp \vec{H}$;

2) векторы $\vec{E}$ и $\vec{H}$ колеблются в плоскостях, перпендикулярных вектору скорости $\vec{\upsilon}$ (поперечная волна);

3) $\vec{E}$ и $\vec{H}$ колеблются в одинаковых фазах (одновременно достигают минимума и максимума).

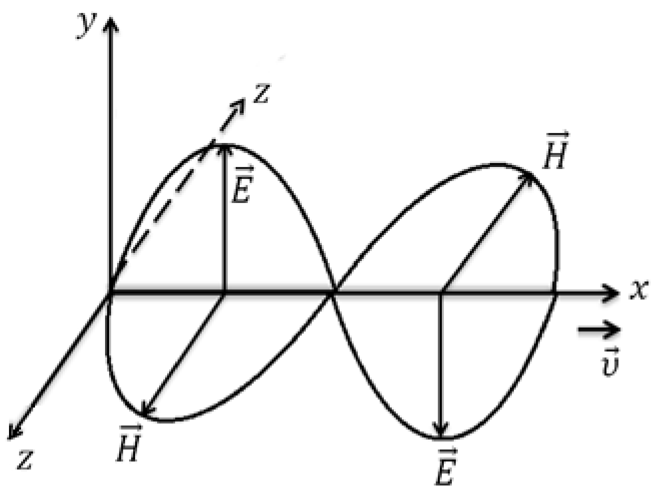


Рис. 49

III.2.4. <u>Монохроматические волны</u> – волны одной строго определенной частоты:

$$E_y = E_0 \cos(\omega t - kx), \tag{2.3}$$

$$H_z = H_0 \cos(\omega t - kx), \tag{2.4}$$

где E_0 и H_0 – амплитуды напряженностей электрического и магнитного полей волны;

$k = \dfrac{\omega}{v}$ – волновое число, x – координата точки.

III.2.5. Свет (световые волны) – электромагнитные волны определенного диапазона частот (или длин волн); делятся на видимую часть (видимый свет) и невидимую часть (ИК и УФ).

Виды излучения	Длина волны, м	Частота волны, Гц
Световые волны		
а) инфракрасное излучение (ИК)	$3\cdot10^{-5} - 7{,}8\cdot10^{-7}$	$3{,}9\cdot10^{13} - 3{,}8\cdot10^{14}$
б) видимый свет	$7{,}8\cdot10^{-7} - 3{,}9\cdot10^{-7}$	$3{,}8\cdot10^{14} - 7{,}7\cdot10^{14}$
в) ультрафиолетовое излучение (УФ)	$4\cdot10^{-7} - 10^{-9}$	$7{,}5\cdot10^{14} - 3\cdot10^{17}$

III.2.6. Световой вектор – вектор напряженности электрического поля $\vec{E}$ в световой волне. (Название обусловлено тем, что при действии света на вещество основное значение имеет электрическая составляющая поля волны, действующая на электроны в атомах вещества).

III.2.7. Когерентные волны – волны, имеющие одинаковую частоту и постоянную во времени разность фаз.

III.2.8. Интерференция волн – явление наложения в пространстве двух или нескольких когерентных волн, в результате которого в разных его точках получается усиление (интерференционный максимум) или ослабление (интерференционный минимум) результирующей волны (интенсивности света).

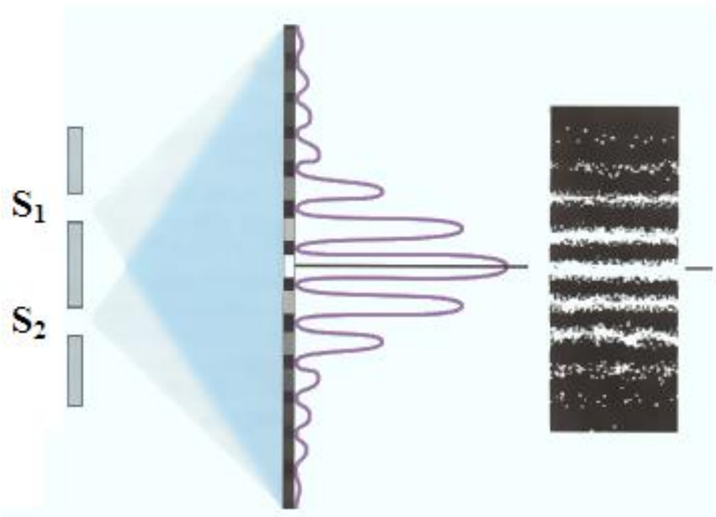


Рис. 50

III.2.9. Оптическая длина пути – произведение геометрического пути на показатель преломления среды:

$$L = S \cdot n. \quad (2.5)$$

III.2.10. Оптическая разность хода – разность оптических путей:

$$\Delta = |L_2 - L_1|. \quad (2.6)$$

III.2.11. Потеря полволны – изменение оптической длины пути на полволны при отражении света от среды с бóльшим показателем преломления (оптически более плотной). При отражении света от оптически более плотной среды $(n_2 > n_1)$ в точке падения луча происходит изменение направления колебания светового вектора $\vec{E}$ на противоположное, т.е. фаза колебания изменяется на $180°$, что соответствует изменению оптического пути на полволны (на $\frac{\lambda}{2}$).

Основные законы.

III.2.12. Условие интерференционного максимума: если оптическая разность хода равна четному числу длин полуволн, то при наложении эти волны усиливают друг друга:

$$max\text{:}\ \Delta = 2m\frac{\lambda}{2}, \quad (2.7)$$

где λ – длина волны в вакууме, $m = 0,1,2,\ldots$ – порядок интерференции.

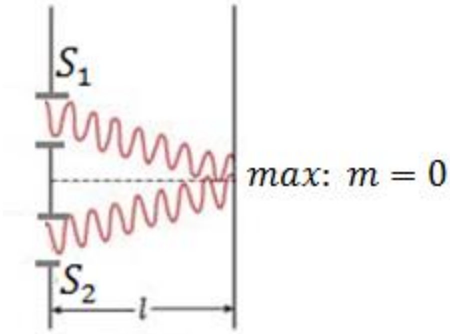


Рис. 51

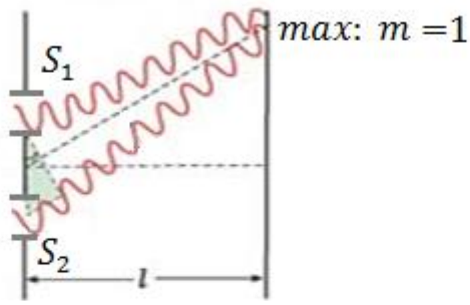


Рис. 52

III.2.13. Условие интерференционного минимума: если оптическая разность хода равна нечетному числу длин полуволн, то при наложении эти волны ослабляют друг друга:

$$min\text{:}\quad \Delta = (2m+1)\frac{\lambda}{2}. \quad (2.8)$$

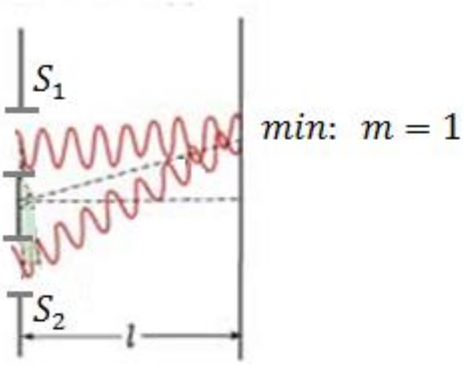


Рис. 53

Примечание: По принципу суперпозиции электрических полей $\vec{E}_{\text{рез}} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$.

a) Усиление световых волн в точке пересечения лучей происходит при условии, если разность фаз $\varphi_2 - \varphi_1 = 2m\pi$, в этом случае результирующая амплитуда колебаний в этой точке равна сумме амплитуд:

$$E_{0\text{рез}} = E_{01} + E_{02}.$$

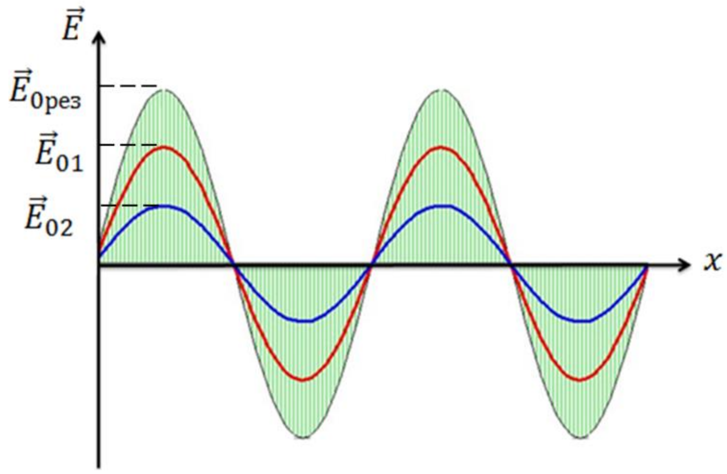


Рис. 54

b) Ослабление световых волн в точке пересечения лучей происходит при условии, если разность фаз $\varphi_2 - \varphi_1 = (2m+1)\pi$, в этом случае результирующая амплитуда колебаний в этой точке равна разности амплитуд:

$$E_{0\text{рез}} = E_{01} - E_{02}; \quad \text{при } E_{01} = E_0 \quad E_{0\text{рез}} = 0.$$

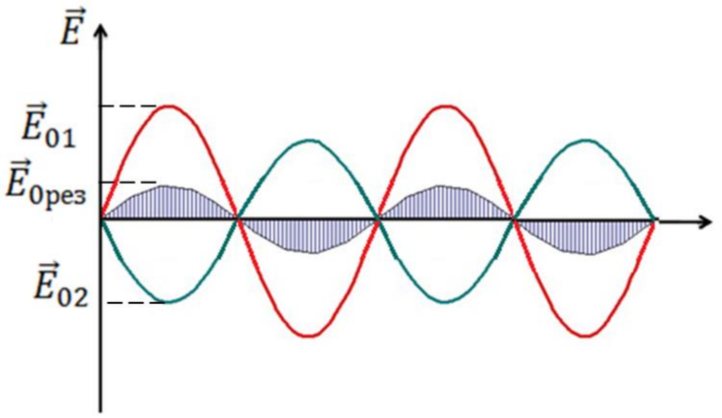


Рис. 55

Пример 2. На тонкую пленку жидкости, имеющую показатель преломления $n = 1{,}45$, падает перпендикулярно к поверхности свет с длиной волны $\lambda = 600$ нм. При какой наименьшей толщине пленки отраженный свет будет усилен в результате интерференции?

Дано:

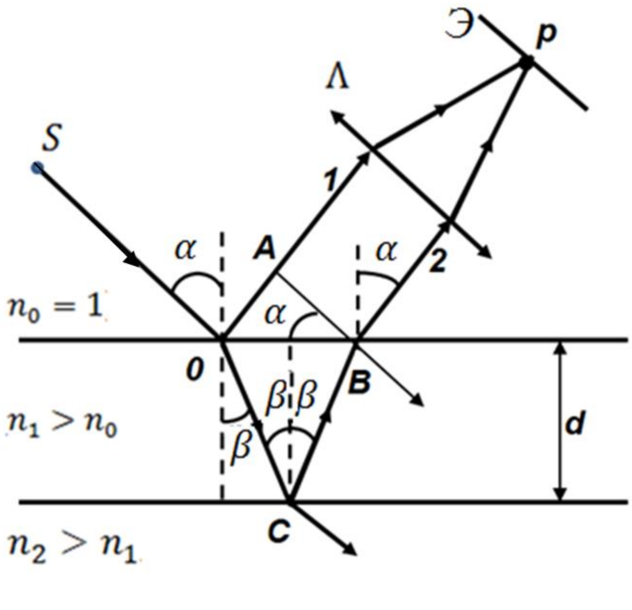
$n_1 = 1{,}45$

$\lambda = 600$ нм $= 600 \cdot 10^{-9}$ м

d–?

Решение.

На рисунке представлена тонкая пленка толщиной d, на неё под углом α к нормали падает параллельный пучок лучей. Луч SO, попадая в точку O, частично отражается (луч 1), частично преломляется (OC).



Преломленный луч OC испытывает отражение от нижней поверхности пленки в точке C и, преломляясь в точке B, выходит из пленки (луч 2). Лучи 1 и 2 параллельны и когерентны, так как образованы от одного луча SO.

Если на пути этих лучей поставить линзу (Λ), то они пересекутся на экране (Э) в точке P. В задаче не указана окружающая пленку среда. Можно предположить, что пленка находится в воздухе $(n_0 = 1)$ на твердой подложке $(n_2 > n_1)$. Найдем оптическую длину пути лучей 1 и 2. Для этого из точки B проведем нормаль BA к лучу 1. Оптические пути лучей 1 и 2 от точек A и B до места их наложения одинаковы. Луч 1 отражается в т. O от оптически более плотной среды, т.е. получает дополнительную разность хода $\frac{\lambda}{2}$, поэтому его оптический путь

$$L_1 = OA \cdot n_0 + \frac{\lambda}{2}. \quad (1)$$

Аналогичное событие происходит в т. C с лучом 2, поэтому оптическая длина пути этого луча

$$L_2 = (OC + CB) \cdot n_1 + \frac{\lambda}{2}. \quad (2)$$

Из (1) и (2) следует, что оптическая разность хода лучей 1 и 2

$$\Delta = L_2 - L_1 = (OC + CB) \cdot n_1 + \frac{\lambda}{2} - \left(OA \cdot n_0 + \frac{\lambda}{2}\right) = (OC + CB) \cdot n_1 - (OA \cdot n_0). \quad (3)$$

Из рисунка следует, что $\cos\beta = \frac{d}{OC}$, т.е. $OC = CB = \frac{d}{\cos\beta}$, (4)

а $\sin\alpha = \frac{OA}{OB}$, т.е. $OA = OB \cdot \sin\alpha$. (5)

Кроме того $tg\,\beta = \left(\frac{OB}{2}\right) \cdot \frac{1}{d}$, откуда $OB = 2\,d\,tg\,\beta$. (6)

Из (3)-(6) получим:

$$\Delta = \frac{2\,d \cdot n_1}{\cos\beta} - 2\,d\,n_0 tg\,\beta \sin\alpha = \frac{2\,d \cdot n_1}{\cos\beta} - \frac{2\,d\,n_0 \sin\beta \sin\alpha}{\cos\beta}. \quad (7)$$

По закону преломления света $\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{n_1}{n_0}$, откуда $n_0 \cdot \sin\alpha = n_1 \cdot \sin\beta$. (8)

Из (7)-(8) $\Delta = \frac{2\,d \cdot n_1}{\cos\beta} - \frac{2\,d\,n_1 \sin^2\beta}{\cos\beta} = \frac{2 \cdot d \cdot n_1}{\cos\beta}(1 - \sin^2\beta) =$

$$= \frac{2\,d \cdot n_1 \cdot \cos^2\beta}{\cos\beta} = 2\,d \cdot n_1 \cdot \cos\beta. \quad (9)$$

По условию отраженный свет должен быть усилен, т.е. выполняется условие максимума интерференции

$$\Delta = 2\,m\frac{\lambda}{2}. \quad (10)$$

Из (9) и (10)

$$2\,d\,n_1 \cos\beta = 2\,m\frac{\lambda}{2} = m\,\lambda. \quad (11)$$

Соотношение (11) можно считать рабочей формулой. Неудобство её состоит в том, что нужно определять $\cos\beta$. Можно дополнить (11) такими преобразованиями, следующими из (8): $\sin\beta = \frac{n_0 \cdot \sin\alpha}{n_1}$.

Известно, что $\cos\beta = \sqrt{1-\sin^2\beta},$ тогда

$$\cos\beta = \sqrt{1 - \frac{n_0{}^2 \cdot \sin^2\alpha}{n_1{}^2}} = \frac{\sqrt{n_1{}^2 - n_0{}^2 \cdot \sin^2\alpha}}{n_1}. \qquad (12)$$

После подстановки (12) в (11) получим удобную формулу для условия максимума $2\, d\, \sqrt{n_1{}^2 - n_0{}^2 \sin^2\alpha} = m\lambda$, откуда

$$d = \frac{m\lambda}{2\sqrt{n_1{}^2 - n_0{}^2 \sin^2\alpha}} \ . \qquad \text{- Рабочая формула.}$$

По условию толщина пленки должна быть минимальной, что соответствует $m = 1$. Свет падает перпендикулярно, т.е. $\alpha = 0°$ $(\sin 0° = 1)$, $n_0 = 1$ (воздух).

$$d = \frac{600 \cdot 10^{-9}}{2\sqrt{(1{,}45)^2 - 1}} = 0{,}29 \cdot 10^{-6}\ (\text{м}) = 0{,}29\ (\text{мкм}).$$

<u>Приложение:</u> 1) $\cos^2\alpha + \sin^2\alpha = 1$ - см. “Приложение” №9.

2) $tg\ \alpha = \frac{\sin\alpha}{\cos\alpha}$ - см. “Приложение” №9.

<u>Примечание:</u>

1) Если в отраженном свете пленка кажется темной, то нужно применить условие минимума:

$$\Delta = (2\, m + 1)\frac{\lambda}{2}.$$

2) Если на пленку падает белый свет (сложный), то усилены (ослаблены) будут все волны видимой части спектра, удовлетворяющие условию максимума (минимума).
3) Если тонкая пленка находится в воздухе без подложки (мыльная пленка, стеклянная пластинка), то у луча 2 в т. C не будет потери полволны.

III. КВАНТОВАЯ ОПТИКА.

Основные понятия.

III.3.1. <u>Квант (фотон)</u> – частица электромагнитного поля, энергия которой равна

$$\varepsilon = h\, \nu, \qquad (3.1)$$

где h – постоянная Планка, ν – частота колебаний.

III.3.2. Дуализм – двойственная природа: свет представляет собой единство противоположных видов движения – корпускулярного (квантового) и волнового (электромагнитного), т.е. представляет собой единство дискретного и непрерывного.

III.3.3. Внешний фотоэффект – явление испускания электронов веществом под действием электромагнитного излучения.

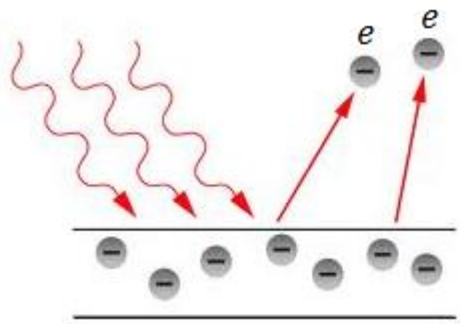


Рис. 56

III.3.4. Работа выхода ($A_{\text{вых}}$) – работа, которую нужно затратить для выхода электрона из металла.

Основные законы.

Уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта (закон сохранения энергии) – энергия падающего фотона передается электрону металла и расходуется на совершение работы выхода и на кинетическую энергию свободного электрона:

$$h\,\nu = A_{вых} + T, \tag{3.2}$$

где $T = \dfrac{m\,v^2}{2}$ – кинетическая энергия фотоэлектрона.

Пример 3. В работе А. Г. Столетова “Активно-электрические исследования” (1888 г.) впервые были установлены основные законы фотоэффекта. Один из результатов его опытов был сформулирован так: “Разряжающим действием обладают лучи самой высокой преломляемости с длиной волны менее 295 нм”. Найти работу выхода A электрона из металла, с которым работал Столетов.

Дано:

$\lambda = 295$ нм $= 295 \cdot 10^{-9}$ м

$A_{\text{вых}}$–?

Решение.

В условии задачи описано явление внешнего фотоэффекта: выход электронов с поверхности металла под действием электромагнитного излучения.

Уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта: $h\nu = A_{\text{вых}} + \dfrac{m\,v^2}{2}$, где ν – частота фотона; $A_{\text{вых}}$ – работа выхода.

Для того, чтобы возник фотоэффект, необходимо, чтобы энергия фотона $h\nu \geq A_{\text{вых}}$, т.е. $\nu \geq \dfrac{A_{\text{вых}}}{h}$. Но $\nu = \dfrac{c}{\lambda}$ и, следовательно, для возникновения фотоэффекта длина волны падающего света должна удовлетворять условию $\lambda \leq \dfrac{h\,c}{A_{\text{вых}}}$. Для условия красной границы фотоэффекта $\lambda_{\text{кр}} = \dfrac{h\,c}{A_{\text{вых}}}$, откуда работа выхода $A_{\text{вых}} = \dfrac{h\,c}{\lambda_{\text{кр}}}$, где $h = 6{,}63 \cdot 10^{-34}$ Дж/с – постоянная Планка (табл.), $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света (табл.).

В опыте Столетова $\lambda = 295$ нм является красной границей фотоэффекта. Тогда работа выхода $A_{\text{вых}} = \dfrac{6{,}63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{295 \cdot 10^{-9}} = 6{,}74 \cdot 10^{-19}$ (Дж).

IV. ФИЗИКА АТОМА.

Основные понятия.

III.4.1. Атом – наименьшая, химически неделимая часть химического элемента, являющаяся носителем его свойств.

III.4.2. Ядро атома – центральная и определяющая часть атома, в которой сосредоточена основная его масса (более 99,9 %) и весь положительный заряд:

$$q_я = Z \cdot e,$$

где Z – порядковый номер элемента в таблице Менделеева, e – элементарный заряд.

III.4.3. Ядерная (планетарная) модель атома: вокруг ядра по замкнутым орбитам движутся электроны, образуя электронную оболочку атома. Число электронов в оболочке ровно Z. Электроны удерживаются на орбитах силой электростатического притяжения к ядру.

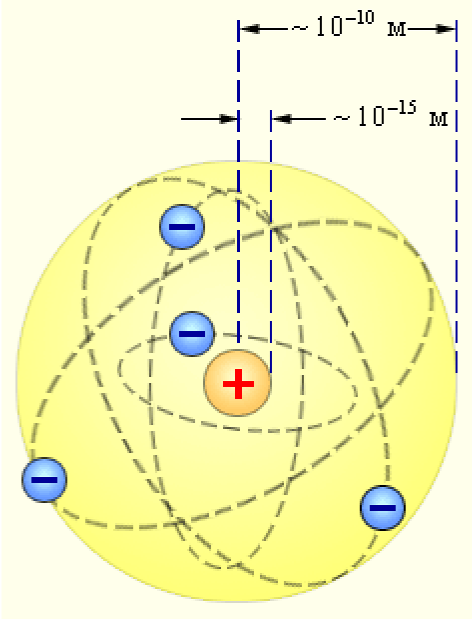


Рис. 57

III.4.4. Водородоподобные ионы: ионы, состоящие из ядра и одного электрона (например, однократно ионизованный He, двукратно ионизованный Li).

III.4.5. Спектр излучения – совокупность электромагнитных волн разной частоты, наблюдаемых в результате разложения света, излучаемого веществом, на составляющие цвета (спектральные линии).

Основные законы.

III.4.6. Первый постулат Бора:

а) в атоме существуют стационарные (не изменяющиеся со временем) орбиты; движение электронов по стационарным орбитам не сопровождается излучением электромагнитных волн;

б) разрешены только такие орбиты, на которых момент импульса электрона кратен приведенной постоянной Планка:

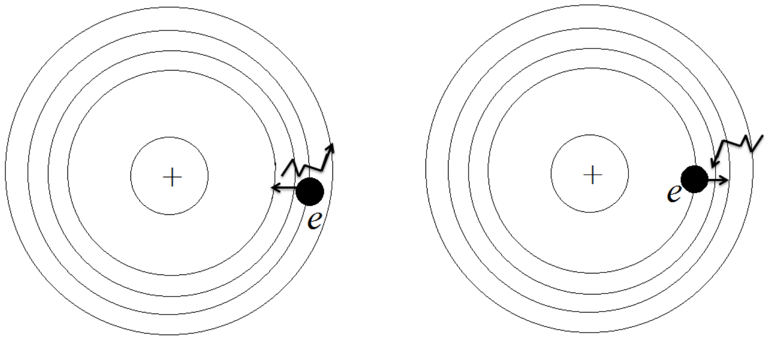
$$m_e\, v_n\, r_n = n\, \hbar, \qquad (4.1)$$

где m_e – масса электрона, v_n и r_n – скорость электрона и радиус орбиты, n =1,2,3,… – номер орбиты, $\hbar = \dfrac{h}{2\pi}$ – приведенная постоянная Планка.

III.4.7. Второй постулат Бора: при переходе электрона с одной стационарной орбиты на другую излучается или поглощается один фотон с энергией, равной разности энергий соответствующих стационарных состояний (E_{n_1} и E_{n_2}):

$$h\,\nu = E_{n_2} - E_{n_1}. \qquad (4.2)$$

При $n_2 < n_1$ происходит излучение фотона, при $n_2 > n_1$ – поглощение фотона.



Излучение фотона Поглощение фотона

Рис. 58

III.4.8. <u>Сериальная формула</u> – закон, позволяющий описать распределение спектральных линий в различных частях спектра излучения (или поглощения) атомов.

Для атома водорода

$$\frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{{n_1}^2} - \frac{1}{{n_2}^2}\right),$$

где $R = 1{,}097 \cdot 10^7$ м$^{-1}$ – постоянная Ридберга, λ – длина волны излучения (поглощения), n_1 и n_2 – последовательный ряд целых чисел, принимающих определенные значения для каждой серии и каждой спектральной линии:

Значение n_1	Значение n_2	Название серии	Область спектра
1	2, 3, 4, …	Лаймана	УФ
2	3, 4, 5, …	Бальмера	Видимый свет
3	4, 5, 6, …	Пашена	ИК
4	5, 6, 7, …	Брэккета	ИК

$n_2 = \infty$ соответствует ионизации атома.

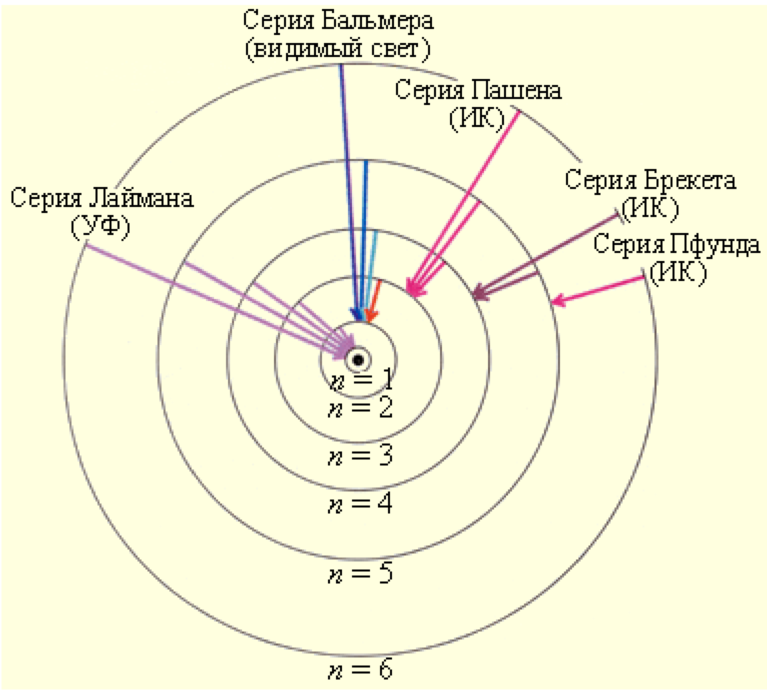


Рис. 59

Следствия:

1) Энергия фотона, излучаемая или поглощаемая атомами водорода

$$\varepsilon = E_i\left(\frac{1}{{n_1}^2} - \frac{1}{{n_2}^2}\right),$$

где E_i – энергия ионизации.

2) Для водородоподобных ионов:

$$\frac{1}{\lambda} = R\,Z^2\left(\frac{1}{{n_1}^2} - \frac{1}{{n_2}^2}\right),$$

где Z – порядковый номер элемента в таблице Менделеева.

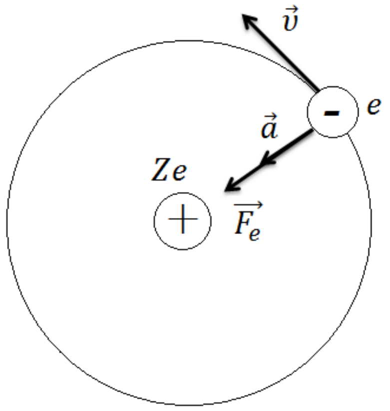
Пример 4. Найти радиус первой боровской орбиты электрона для иона Li^{++}. Какую наименьшую энергию нужно сообщить электрону, чтобы ион перешел в возбужденное состояние?

Дано:	Решение.
Li^{++} $Z = 3$	Литий является третьим элементом в таблице Менделеева, следовательно, атом лития содержит 3 электрона, а его ядро – 3 протона. У иона Li^{++} остается один электрон, т.е. этот ион имеет водородоподобное строение. Электрон в нем удерживается на орбите электростатической силой притяжения; по закону Кулона эта сила равна:
$r_1 - ?$ $E - ?$	

$$F_e = \frac{1}{4\,\pi\,\varepsilon_0}\,\frac{|q_1|\cdot|q_2|}{r^2}. \qquad (1)$$

Для Li^{++} $|q_1| = Z\,|e| = 3e$ - заряд ядра, а $|q_2| = |e| = e$ - модуль заряда электрона ($e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл – элементарный заряд).

Из (1) $$F_e = \frac{1}{4\,\pi\,\varepsilon_0}\,\frac{3e\cdot e}{r^2} = \frac{3\,e^2}{4\,\pi\,\varepsilon_0 r^2}, \qquad (2)$$



Сила $\vec{F_e}$ направлена по прямой, соединяющей заряды, т.е. в нашем случае – по радиусу к центру. По второму закону Ньютона эта сила создает ускорение,

сонаправленное с силой: $\vec{a} = \dfrac{\vec{F}}{m}$, т.е. модуль ускорения $a = \dfrac{F_e}{m}$; (3)
направлен вектор $\vec{a} \perp \vec{\upsilon}$. Ускорение, перпендикулярное скорости, характеризует изменение направления скорости, называется нормальным и определяется по формуле $a_n = \dfrac{\upsilon^2}{r}$. (4)

Из (2), (3) и (4)

$$\frac{3\,e^2}{4\,\pi\,\varepsilon_0\,r^2} = m\,\frac{\upsilon^2}{r}. \qquad (5)$$

Равенство (5) содержит 2 неизвестные величины: r и υ. Для нахождения любой из них требуется второе уравнение, связывающее эти неизвестные.

В водородоподобном ионе должен выполняться первый постулат Бора: на стационарных орбитах выполняется условие

$$m\,\upsilon\,r = n\,\hbar. \qquad (6)$$

Из (6) определим $\upsilon = \dfrac{n\,\hbar}{m\,r}$ и подставим в (5):

$$\frac{3\,e^2}{4\,\pi\,\varepsilon_0\,r} = \frac{m\,n^2\,\hbar^2}{m^2\,r^2},$$

отсюда при условии $\hbar = \dfrac{h}{2\,\pi}$

$$r_n = \frac{4\,\pi\,\varepsilon_0\,n^2\,h^2}{4\,\pi^2\,3\,e^2\,m} = n^2\,\frac{h^2\varepsilon_0}{3\,\pi\,m\,e^2} \qquad \text{- рабочая формула} \tag{7}$$

По условию $n = 1$ (первая орбита).

$h = 6{,}63 \cdot 10^{-34}$ Дж · с - постоянная Планка (табл.);

$\varepsilon_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-12}\ \frac{\text{Ф}}{\text{м}}$ - электрическая постоянная (табл.);

$\pi = 3{,}14$; $m = 9{,}11 \cdot 10^{-31}$ кг – масса электрона (табл.);

$e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл – элементарный заряд (табл.).

Из (7) $\qquad r_1 = \dfrac{\left(6{,}63\cdot10^{-34}\right)^2\cdot8{,}85\cdot10^{-12}}{3\cdot3{,}14\cdot9{,}11\cdot10^{-31}\cdot(1{,}6\cdot10^{-19})^2} = 0{,}177 \cdot 10^{-10}$ (м).

Для перехода иона Li^{++} в возбужденное состояние ему надо сообщить энергию, равную разности энергий электрона в соответствующих состояниях (закон сохранения энергии):

$$E = E_2 - E_1. \tag{8}$$

По второму постулату Бора

$$E_2 - E_1 = h\nu, \tag{9}$$

где ν - частота фотона.

Для водородоподобных ионов (сериальная формула)

$$\nu = \frac{c}{\lambda} = R\,c\,Z^2\,\left(\frac{1}{{n_1}^2} - \frac{1}{{n_2}^2}\right), \tag{10}$$

где $R = 1{,}097 \cdot 10^7$ см$^{-1}$ – постоянная Ридберга (табл.);

$c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света в вакууме (табл.).

Для сообщения наименьшей энергии нужно перевести электрон на вторую орбиту: $n_2 = 2$.

Из (8), (9), (10) искомая энергия

$$E = h \cdot R \cdot c \cdot Z^2 \left(\frac{1}{{n_1}^2} - \frac{1}{{n_2}^2}\right). \quad \text{– Рабочая формула.} \qquad (11)$$

$$E = 6{,}63 \cdot 10^{-34} \cdot 1{,}097 \cdot 10^7 \cdot 3 \cdot 10^8 \cdot 3^2 \left(1 - \frac{1}{2^2}\right) = 147{,}28 \cdot 10^{-19}\ (\text{Дж}) = 91{,}9\ (\text{эВ}).$$

V. ЭЛЕМЕНТЫ ФИЗИКИ АТОМНОГО ЯДРА.

Основные понятия.

III.5.1. Нуклоны – элементарные частицы, образующие ядро.

III.5.2. Массовое число (A) – число нуклонов в атомном ядре.

III.5.3. Протон $({}^1_1p)$ – элементарная частица с положительным элементарным зарядом (e).

III.5.4. Зарядовое число (Z) – число протонов в ядре, совпадающее с порядковым номером химического элемента в Периодической системе элементов.

III.5.5. Нейтрон $({}^1_0n)$ – нейтральная частица вещества.

III.5.6. Нуклиды – вид атомных ядер, которые однозначно характеризуются массовым числом A и зарядовым числом Z.

III.5.7. Изотопы – атомные ядра химических элементов с одинаковым числом протонов Z, но с различным числом N и, таким образом, с различным массовым числом A.

III.5.8. Капельная модель ядра рассматривает ядро как скопление тесно связанных друг с другом неподвижных шарообразных нуклонов. Между нуклонами существует сильное взаимодействие.

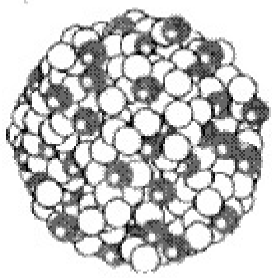


Рис. 60

III.5.9. Ядерные силы обуславливают сильную связь нуклонов в ядре атома и принципиально отличаются от электростатических и гравитационных сил:

1) короткодействующие (до 10^{-15} м);
2) обладают свойством зарядовой независимости;
3) не являются центральными;
4) действуют только между ближайшими нуклонами.

III.5.10. Дефект массы – разность между суммой масс покоя нуклонов, составляющих ядро, и массой покоя атомного ядра (массы выражены в атомных единицах массы):

$$\Delta m = \left[Z \cdot m_p + (A - Z)m_n\right] - m_я. \quad (4.1)$$

III.5.11. Энергия связи ядра – энергия, которую необходимо затратить для разделения ядра на составные части (невзаимодействующие нуклоны):

$$E_{св} = \Delta m \cdot c^2, \quad (4.2)$$

где c – скорость света в вакууме.

III.5.12. Радиоактивный распад – естественное самопроизвольное превращение ядер.

III.5.13. Постоянная радиоактивного распада (λ) – доля ядер, распадающихся за 1с:

$$\lambda = \left|\frac{dN}{N \cdot dt}\right|, \quad (4.3)$$

где dN – число ядер, распавшихся за интервал времени dt, N - число ядер до начала распада.

III.5.14. Период полураспада $(T_{1/2})$ – время, за которое исходное число радиоактивных ядер в среднем уменьшается вдвое. Период полураспада связан с постоянной радиоактивного распада:

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}. \quad (4.4)$$

III.5.15. Активность (A) – число распадов, происходящих с ядрами в 1 с (скорость распада):

$$A = -\frac{dN}{dt}. \quad (4.5)$$

Знак $\ll - \gg$ указывает на уменьшение числа радиоактивных ядер.

III.5.16. Ядерные реакции – превращения атомных ядер при взаимодействии с элементарными частицами или друг с другом.

III.5.17. α - распад – ядерная реакция, сопровождающаяся образованием ядер гелия ${}_2^4He$ (α-частиц).

III.5.18. β - распад - тип радиоактивного распада, при котором ядро может излучать бета-частицу (электрон или позитрон). В случае испускания электрона $({}_{-1}^{0}e)$ он называется β^- - распадом, а в случае испускания позитрона $({}_{+1}^{0}e)$ - β^+ - распадом.

Основные законы.

III.5.19. Закон сохранения зарядовых чисел: сумма зарядовых чисел до и после ядерной реакции не изменяется:

$$\sum Z = const. \quad (4.6)$$

III.5.20. Закон сохранения массовых чисел: сумма массовых чисел в процессе ядерной реакции не изменяется:

$$\sum A = const. \qquad (4.7)$$

III.5.21. Закон радиоактивного распада:

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda t}, \qquad (4.8)$$

где N_0 – начальное число нераспавшихся ядер (при $t = 0$); N –число нераспавшихся ядер в момент времени t, $e = 2{,}7$ – основание натурального логарифма, t - время.

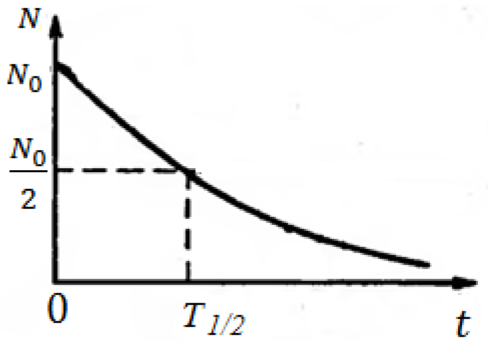


Рис. 61

Пример 5. Определить начальную активность препарата магния ${}^{27}_{12}Mg$ массой 0,2 мкг.

Дано:

${}^{27}_{12}Mg$

$m = 0{,}2$ мкг $= 0{,}2 \cdot 10^{-6}$ кг

A_0 - ?

Решение.

При радиоактивном распаде вещества выполняется закон $N = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$, (1)

где N_0 – число радиоактивных ядер в момент времени, принятый за начало отсчета ($t = 0$); N - число радиоактивных ядер, оставшихся к моменту времени t; $e = 2{,}7$ (табл.) – основание натурального логарифма, λ - постоянная радиоактивного распада.

Активность изотопа характеризует скорость радиоактивного распада:

$$A = -\frac{dN}{dt}. \qquad (2)$$

Знак “–” показывает, что число радиоактивных ядер с течением времени убывает.

Из (1) $$\frac{dN}{dt} = -\lambda\, N_0 \cdot e^{-\lambda t}\ . \qquad (3)$$

Из (2) и (3) $\qquad A = \lambda\, N_0 \cdot e^{-\lambda t}$.

Начальная активность соответствует $t = 0$:

$$A_0 = \lambda\ \cdot N_0\ . \qquad (4)$$

Постоянная радиоактивного распада λ связана с периодом полураспада $T_{1/2}$ соотношением

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}\ . \qquad (5)$$

Число радиоактивных ядер, содержащихся в данной массе m, равно постоянной Авогадро N_A на количество вещества ν:

$$N_0 = \nu \cdot N_A = \frac{m}{\mu}\, N_A, \qquad (6)$$

где μ - молярная масса.

Из (4), (5) и (6)

$$A_0 = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} \cdot \frac{m}{\mu}\, N_A. \qquad (7)$$

Период полураспада $^{27}_{12}Mg$ $\quad T_{1/2} = 10$ мин $= 600$ с (табл.); $\ln 2 = 0{,}693$; $\mu = 27 \cdot 10^{-3}$ кг/моль; $N_A = 6 \cdot 10^{23}$ моль$^{-1}$ (табл.), т.е. из (7)

$$A_0 = \frac{0{,}693 \cdot 0{,}2 \cdot 10^{-6} \cdot 6 \cdot 10^{23}}{600 \cdot 27 \cdot 10^{-3}} = 5{,}13 \cdot 10^{15}\ \text{(Бк)}.$$

<ins>Приложение:</ins> производная $\frac{d(e^{ax})}{dx} = a \cdot e^{ax}$ - см. “Приложение” №15.

<ins>Пример 6.</ins> При соударении α - частицы с ядром бора $^{10}_{5}B$ произошла ядерная реакция, в результате которой образовалось дочернее ядро и протон. Определить дефект массы и энергию связи этого ядра.

Дано:	Решение.
α – частица	α – частица представляет собой ядро гелия ${}^{4}_{2}He$.
${}^{10}_{5}B$ – материнское ядро	Запишем ядерную реакцию
	$${}^{10}_{5}B + {}^{4}_{2}He \rightarrow {}^{1}_{1}p + {}^{A}_{Z}X.$$
${}^{A}_{Z}X$ - ?, Δm - ?, $E_{св}$–?	Применим закон сохранения массовых чисел
	$\sum\limits_{i=1}^{n} A = const$; $10 + 4 = 1 + A$, отсюда $A = 13$.

Применим закон сохранения зарядовых чисел $\sum\limits_{i=1}^{n} Z = const,\ 5 + 2 = 1 + Z$, отсюда $Z = 6$.

По таблице Менделеева определяем, что дочерним ядром является ядро изотопа углерода ${}^{13}_{6}C$.

Дефект массы ядра Δm есть разность между суммой масс свободных нуклонов (протонов и нейтронов) и массой ядра, т.е.

$$\Delta m = Z\, m_p + (A - Z)\, m_n - m_я, \tag{1}$$

где Z - число протонов, $A - Z$ - число нейтронов, m_p - масса протона, m_n – масса нейтрона, $m_я$ - масса ядра.

Массу ядра можно получить, если из массы атома вычесть массу электронов, образующих электронную оболочку атома:

$$m_я = m_а - Z \cdot m_e. \tag{2}$$

Из (1) и (2) $\Delta m = Z\, m_p + (A - Z)\, m_n - m_а + Z\, m_e$

или $$\Delta m = Z\left(m_p + m_e\right) + (A - Z)\, m_n - m_а. \tag{3}$$

Заметим, что $m_p + m_e = m_H$, где m_H – масса атома водорода, тогда из (3)

$$\Delta m = Z\, m_H + (A - Z)\, m_n - m_а, \tag{4}$$

где m_H = 1,00783 а.е.м. (табл.); m_n = 1,00867 а.е.м. (табл.);

$m_а$ = 13,00335 а.е.м. (табл.).

Подставив в (4) числовые значения масс, получим

$\Delta m = [6 \cdot 1{,}00783 + (13 - 6) \cdot 1{,}00867 - 13{,}00335\,] = 0{,}10432$ а.е.м.

В соответствии с законом пропорциональности массы и энергии

$$E_{св} = c^2 \cdot \Delta m, \tag{5}$$

где $c^2 = 9 \cdot 10^{16}$ м^2/с^2 или $c^2 = \dfrac{E}{\Delta m} = 9 \cdot 10^{16}$ Дж/кг.

Если вычислять энергию связи, пользуясь внесистемными единицами, то $c^2 = 931$ МэВ/а.е.м. Тогда из формулы (5)

$E_{св} = 931 \cdot 0{,}10432 = 97{,}12192$ МэВ.

<u>Примечание</u>: в ядерной физике допускается применение внесистемных единиц массы – а.е.м. (атомные единицы массы). 1 а.е.м. = $1{,}66 \cdot 10^{-27}$ кг.

Задачи для самостоятельного решения

Порядок выполнения контрольной работы

19. Внимательно прочитайте соответствующие разделы учебного пособия.
20. Прочитайте соответствующий материал по учебнику.
21. После усвоения теоретических положений рассмотрите примеры решения задач в пособии.
22. Внимательно прочитайте условие задачи, запишите краткое условие («Дано»), переведите единицы измерения в СИ.
23. Сделайте к задаче поясняющий рисунок.
24. Опираясь на математические формулы для основных понятий и законов, получите рабочую (конечную) формулу.
25. При необходимости найдите в справочнике значение постоянных величин.
26. Подставив в конечную формулу числовые значения, произведите расчеты.
27. Запишите ответ с указанием единиц измерения.

Таблица вариантов

Номер варианта определяется последней цифрой шифра

Вариант	Номера задач					
1	1	11	21	31	41	51
2	2	12	22	32	42	52
3	3	13	23	33	43	53
4	4	14	24	34	44	54
5	5	15	25	35	45	55
6	6	16	26	36	46	56
7	7	17	27	37	47	57
8	8	18	28	38	48	58
9	9	19	29	39	49	59
0	10	20	30	40	50	60

Рекомендации: для решения задач № 1-10 прочитайте в части III раздел I и рассмотрите пример № 1.

1. Сложить два колебания, выраженные уравнениями

$$x_1 = 5\cos\frac{2\pi}{T}\ (t+\tau_1), \text{см},$$

$$x_2 = 3\cos\frac{2\pi}{T}\ (t+\tau_2), \text{см}.$$

Период колебаний $T = 4$ с, $\tau_1 = \frac{1}{6}$ с, $\tau_2 = \frac{1}{3}$ с.

2. Материальная точка участвует в двух колебаниях, выраженных уравнениями

$$x_1 = 3\cos t\text{, см,}$$
$$x_2 = 3\cos\left(t + \frac{\pi}{3}\right)\text{, см.}$$

Написать уравнение результирующего колебания.

3. Материальная точка участвует в двух одинаково направленных колебаниях с частотой $\nu = 1$ с $^{-1}$. Разность фаз этих колебаний равна $\frac{3}{4}\pi$, а амплитуды равны 6 см и 4 см соответственно. Написать уравнение результирующего колебания.

4. Материальная точка участвует в двух колебаниях, выраженных уравнениями

$$x_1 = 3\cos\left(t + \frac{\pi}{3}\right)\text{, см,}$$
$$x_2 = 4\cos\left(t + \frac{7}{6}\pi\right)\text{, см.}$$

Написать уравнение результирующего колебания.

5. Материальная точка участвует в двух одинаково направленных колебаниях с частотой $\nu = \frac{1}{2}$ с $^{-1}$. Разность фаз этих колебаний равна $60°$, а амплитуды равны 8 см и 4 см соответственно. Написать уравнение результирующего колебания.

6. Сложить два одинаково направленных гармонических колебания отличающихся по фазе на $\frac{\pi}{2}$, имеющих одинаковые периоды 2 с и амплитуды $A_1 = 4$ см и $A_2 = 3$ см.

7. Материальная точка участвует в двух колебаниях, выраженных уравнениями

$$x_1 = 2\cos\pi t\text{, см,}$$
$$x_2 = -\cos\left(\pi t + \frac{\pi}{2}\right)\text{, см.}$$

Написать уравнение результирующего колебания.

8. Сложить два одинаково направленных гармонических колебания с одинаковыми периодами $T = 1$ с и начальными фазами $\varphi_1 = \frac{\pi}{3}$ и $\varphi_2 = \frac{\pi}{2}$; амплитуды колебаний соответственно равны 2 и 3 см.

9. Материальная точка участвует в двух одинаково направленных колебаниях с частотой $\nu = \frac{1}{6}$ с $^{-1}$. Разность фаз этих колебаний равна $30°$, а амплитуды равны 5 см и 3 см соответственно. Написать уравнение результирующего колебания.

10. Сложить два одинаково направленных гармонических колебания с одинаковыми периодами $T = 6$ с; амплитудами $A_1 = 4$ см, $A_2 = 6$ см, сдвинутыми по фазе на $45°$.

Рекомендации: для решения задач № 11-20 прочитайте в части III раздел II и рассмотрите пример № 2.

11. Определить наименьшую толщину глицериновой пленки ($n = 1{,}47$), если при освещении её белым светом, падающим под углом $45°$, она в отраженном свете кажется красной? Длина волны красных лучей $\lambda = 0{,}63$ мкм.

12. На тонкую плёнку скипидара ($n = 1{,}48$) падает белый свет. Под углом зрения $60°$ она кажется оранжевой в отраженном свете. Длина волны оранжевых лучей $\lambda = 0{,}625$ мкм. Каким будет казаться цвет этой плёнки в отраженном свете при вдвое меньшем угле зрения?

13. На тонкую пленку толщиной $d = 0{,}16$ мкм под углом $30°$ падает белый свет. Определить показатель преломления пленки, если в отраженном свете пленка кажется фиолетовой. Длина волны фиолетовых лучей $\lambda = 0{,}4$ мкм.

14. На тонкую пленку глицерина (n=1,47) падает белый свет под углом 30°. В отраженном свете плёнка кажется светло-зеленой, длина волны этого цвета $\lambda = 0{,}540$ мкм. Каким будет казаться цвет пленки в отраженном свете, если свет будет падать под углом $60°$?

15. Какую наименьшую толщину должна иметь пленка из скипидара ($n = 1{,}48$), если на неё под углом $30°$ падает белый свет и она в отраженном свете кажется желтой? Длина волны желтых лучей $\lambda = 0{,}58$ мкм.

16. На тонкую глицериновую плёнку ($n = 1{,}47$) толщиной $d = 1{,}5$ мкм нормально к её поверхности падает белый свет. Определить длины волн лучей видимого участка спектра ($0{,}4 \leq \lambda \leq 0{,}8$ мкм), которые будут ослаблены в результате интерференции.

17. Найти наименьший угол падения монохроматического света ($\lambda = 0{,}5$ мкм) на мыльную плёнку ($n = 1{,}33$) толщиной $d = 0{,}1$ мкм, находящуюся в воздухе, при котором плёнка в отраженном свете кажется темной.

18. Пучок белого света падает нормально к поверхности стеклянной пластинки ($n = 1{,}5$) толщиной $d = 0{,}4$ мкм. Какие длины волн, лежащие в пределах видимого спектра ($400\text{ нм} \leq \lambda \leq 700\text{ нм}$) усиливаются в отраженном свете?

19. На тонкую мыльную плёнку ($n = 1{,}33$) падает белый свет под углом $45°$ к поверхности плёнки. При какой наименьшей толщине она будет казаться окрашенной в желтый цвет? Длина волны желтых лучей $\lambda = 600$ нм.

20. На тонкую плёнку толщиной $d = 0{,}1$ мкм, находящуюся в воздухе, падает нормально пучок лучей белого света. Отраженный свет с длиной волны $\lambda = 0{,}55$ мкм оказался максимально усиленным в результате интерференции. Определить показатель преломления вещества пленки.

<u>Рекомендации:</u> для решения задач № 21-30 прочитайте в части III раздел III и рассмотрите пример № 3.

21. Найти длину волны света, соответствующую красной границе фотоэффекта для лития.
22. Длина волны света, соответствующая красной границе фотоэффекта, для некоторого металла 275 нм. Найти минимальную энергию фотона, вызывающего фотоэффект.
23. Найти длину волны света, соответствующую красной границе фотоэффекта для натрия.
24. Длина волны света, соответствующего красной границе фотоэффекта, для некоторого металла 275 нм. Определить скорость электронов, вырываемых из металла светом с длиной волны 180 нм.
25. Найти длину волны света, соответствующую красной границе фотоэффекта для калия.
26. Фотоэффект начинается при частоте света $6 \cdot 10^{14}$ Гц. Найти работу выхода электрона из металла.
27. Найти длину волны света, соответствующую красной границе фотоэффекта для цезия.
28. Фотоны с энергией 4,9 эВ вырывают электроны из металла с работой выхода равной 4,5 эВ. Найти максимальную скорость фотоэлектронов.
29. Найти скорость фотоэлектронов, вырываемых при освещении калия светом с длиной волны 330 нм.
30. Найти скорость фотоэлектронов, вырываемых при освещении платины светом с длиной волны 204 нм.

<u>Рекомендации:</u> для решения задач № 31-40 прочитайте в части III раздел IV и рассмотрите пример № 4.

31. Найти радиус третьей боровской электронной орбиты в атоме водорода и скорость электрона на ней.
32. Найти кинетическую энергию электрона, находящегося на второй орбите атома водорода.
33. Найти радиус первой боровской электронной орбиты для однократно ионизованного атома гелия He^{+} и скорость электрона на ней.
34. Найти кинетическую энергию электрона, находящегося на первой орбите в однократно ионизованном атоме гелия He^{+}.
35. Определить угловую скорость электрона на первой боровской орбите атома водорода.

36. Найти наименьшую длину волны спектральной линии водорода в видимой области спектра. Какую наименьшую скорость должны иметь электроны, чтобы при возбуждении атомов водорода ударами электронов появилась эта линия?

37. Найти наибольшую длину волны спектральной линии водорода в видимой области спектра. Какую скорость должны иметь электроны, чтобы при возбуждении атомов водорода ударами электронов появилась эта линия?

38. Найти наименьшую длину волны спектральной линии водорода в ультрафиолетовой области спектра. Какую набольшую скорость должны иметь электроны, чтобы при возбуждении атомов водорода ударами электронов появилась эта линия?

39. Определить угловую скорость электрона на первой боровской орбите в однократно ионизованном атоме гелия He^{+}.

40. Найти наибольшую длину волны спектральной линии водорода в инфракрасной области спектра. Какую скорость должны иметь электроны, чтобы при возбуждении атомов водорода ударами электронов появилась эта линия?

Рекомендации: для решения задач № 41-50 прочитайте в части III раздел V и рассмотрите пример № 5.

41. Найти период полураспада $T_{1/2}$ радиоактивного изотопа, если его активность за время $t = 10$ сут уменьшилась на 24% по сравнению с первоначальной.

42. Определить, какая доля радиоактивного изотопа $^{225}_{89}Ac$ распадается в течение времени $t = 6$ сут. Период полураспада изотопа $^{225}_{89}Ac$ равен $T_{1/2} = 10$ сут.

43. Активность A некоторого изотопа за время $t = 10$ сут уменьшилась на 20%. Определить период полураспада $T_{1/2}$ этого изотопа.

44. Найти период полураспада $T_{1/2}$ радиоактивного изотопа, если 5/8 начального количества ядер этого изотопа распалось за время $t = 849$ с.

45. Счетчик α - частиц, установленный вблизи радиоактивного изотопа, при первом измерении регистрировал N_1=1400 частиц в минуту, а через время $t = 4$ ч – только $N_2 = 400$. Определить период полураспада $T_{1/2}$ изотопа.

46. Из каждого миллиона атомов радиоактивного изотопа каждую секунду распадается 200 атомов. Определить период полураспада $T_{1/2}$ изотопа.

47. Период полураспада изотопа $^{60}_{27}Co$ равен $T_{1/2} = 5{,}3$ года. Определить, какая доля этого изотопа распадается через $t = 5$ лет.

48. За год распалось 60% некоторого исходного радиоактивного вещества. Определить период полураспада $T_{1/2}$ этого элемента.

49. Постоянная радиоактивного распада для элемента $^{228}_{88}Ra$ равна $\lambda = 3{,}28 \cdot 10^{-9}$ с $^{-1}$. Определить, какая часть ядер этого элемента останется через $t = 5$ лет.

50. Период полураспада радиоактивного аргона $^{41}_{18}Ar$ равен $T_{1/2}$=110 мин. Определить время, в течение которого распадается 25% начального количества атомов.

Рекомендации: для решения задач № 51-60 прочитайте в части III раздел V и рассмотрите пример № 6.

51. Ядро, состоящее из 92 протонов и 143 нейтронов, выбросило α-частицу. Какое ядро образуется в результате α-распада? Определить дефект массы и энергию связи образовавшегося ядра.

52. В какой элемент превращается $^{238}_{92}U$ после трех α – распадов и двух β^- – превращений. Определить дефект массы образовавшегося ядра.

53. Протон налетает на ядро $^{17}_{8}O$ и выбивает нейтрон. Какое ядро образуется и чему равен дефект массы этого ядра.

54. С каким ядром нужно столкнуть протон, чтобы получились две α-частицы? Определить дефект массы этого ядра и энергию связи.

55. В результате захвата протона ядром $^{19}_{9}F$ образуется новое ядро и α-частица. Определить дефект массы образовавшегося ядра.

56. В эксперименте по облучению ядра $^{63}_{29}Cu$ протонами выбивается нейтрон. Какое ядро образуется и чему равна энергия связи образовавшегося ядра?

57. В результате опытов по облучению ядра $^{60}_{28}Ni$ α-частицами был получен нейтрон и дочернее ядро. Какое это ядро и чему равен дефект массы этого ядра?

58. $^{56}_{28}Ni$ неустойчив и путем двух последовательных β^+-распадов превращается в новый элемент. Какое ядро образуется и чему равна энергия связи этого ядра?

59. Ядра радиоактивного изотопа тория $^{232}_{90}Th$ претерпевают последовательно α – распад, два β^- – распада и α – распад. Определить конечный продукт деления и дефект массы его ядра.

60. При поглощении нейтрона изотопами урана $^{238}_{92}U$ и тория $^{232}_{90}Th$ образуются (через два последовательных β^--распада) изотопы, являющиеся ядерным горючим. Какие изотопы образуются в результате этих реакций. Определить дефект массы одного из них.

Табличные данные

I. Физические постоянные (приближительные значения)

Постоянная Авогадро	$N_A = 6 \cdot 10^{23}$ моль$^{-1}$
Элементарный заряд	$e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл
Скорость света в вакууме	$c = 3 \cdot 10^{8}$ м/с
Постоянная Планка	$h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж $\cdot$ с
Постоянная Ридберга	$R = 1,097 \cdot 10^{7}$ м$^{-1}$
Энергия ионизации атома водорода	$E_i = 2,18 \cdot 10^{-18}$ Дж (13, 6 эВ)
Электрическая постоянная	$\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м
Магнитная постоянная	$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м
Масса электрона	$m_e = 9,11 \cdot 10^{-31}$ кг
Масса протона	$m_p = 1,672 \cdot 10^{-27}$ кг
Масса нейтрона	$m_n = 1,675 \cdot 10^{-27}$ кг
Атомная единица массы	1 а. е. м. $= 1,66 \cdot 10^{-27}$ кг
Электрон – вольт	1 эВ $= 1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж

II. Свойства веществ

Работа выхода (эВ)

Ag	Серебро	4,74	K	калий	2,0
Li	Литий	2,4	Cs	цезий	1,9
Na	Натрий	2,3	Pt	платина	5,3

Масса некоторых нуклидов (а.е.м.)

$^{1}_{1}H$	1,00783	$^{17}_{9}F$	17,002095	$^{226}_{88}Ra$	226,0254
$^{7}_{3}Li$	7,01601	$^{27}_{13}Al$	26,98154	$^{231}_{90}Th$	231,0381
$^{13}_{6}C$	13,00335	$^{30}_{14}Si$	29,97377	$^{233}_{92}U$	233,03964
$^{14}_{7}N$	14,00307	$^{56}_{26}Fe$	55,93494	$^{239}_{94}Pu$	239,05216
$^{16}_{8}O$	15,99491	$^{63}_{30}Zn$	62,93321	нейтрон ($^{1}_{0}n$)	1,00867

Относительная масса (A) (приблизительное значение) и порядковый номер (Z) элементов.

Элемент	Символ	A	Z	Элемент	Символ	A	Z
азот	N	14	7	гелий	He	4	2
водород	H	1	1	кислород	O	16	8

III. Основные единицы системы СИ

	Единицы	
	название	Обозначение
Длина	метр	м
Масса	килограмм	кг
Время	секунда	с

IV. Единицы механических и электромагнитных величин

Величина	Обозначение	Наименование	Обозначение
Частота колебаний	ν	секунда в минус первой степени	с^{-1}
Сила	F	ньютон	H
Работа, энергия, теплота	Q	джоуль	Дж
Электрический заряд	q	кулон	Кл
Напряженность электрического поля	E	вольт на метр	$\frac{\text{В}}{\text{м}}$
Напряженность магнитного поля	H	ампер на метр	$\frac{\text{А}}{\text{м}}$
Активность изотопа	A	беккерель	Бк

ПРИЛОЖЕНИЕ

1. Некоторые часто встречающиеся числа и понятия

$\pi \approx 3{,}14;\ 4\pi \approx 12{,}57;\ \pi^2 \approx 9{,}9;\ e \approx 2{,}7;\ \sqrt{2} \approx 1{,}4;\ \sqrt{3} \approx 1{,}7;\ 1^0 \approx 0{,}017$ рад;

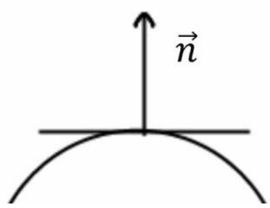
1 мин = 60 с; 1 ч = 60 мин; 1 сутки = 24 часа = 8 864 400 с.

2. Скаляр (скалярная величина) – величина, значение которой определяется только положительным или отрицательным числом.

3. Алгебраическая величина – взятое со знаком плюс или минус абсолютное численное значение величины.

4. Алгебраическая сумма – сумма чисел с учетом знака; когда пишут знак суммы $\sum$ (сигма) скалярных величин, подразумевается именно алгебраическая сумма.

5. Нормаль — прямая, перпендикулярная к касательной к кривой или перпендикулярная плоскости, касательной к поверхности.



6. Вектор (векторная величина) – величина, значение которой определяется не только действительным числом, но и направлением в пространстве.

На рисунке вектор изображается в зависимости от расположения

   1. в плоскости рисунка 

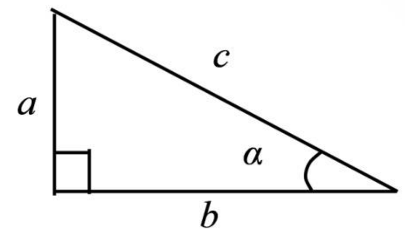
   2. перпендикулярно плоскости рисунка “на нас” $\odot\ \vec{r}$

   3. перпендикулярно плоскости рисунка “от нас” $\otimes\ \vec{r}$

7. Радиус-вектор точки – вектор, начало которого совпадает с центром окружности или с началом системы координат, а конец – с данной точкой.

8. Модуль вектора – числовое значение длины вектора.

9. Тригонометрические функции



a, b – катеты прямоугольного треугольника; c – гипотенуза.

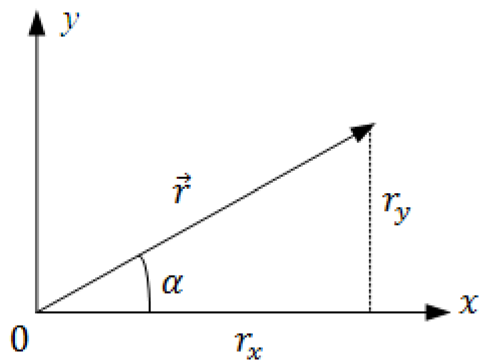
Синус $\sin\alpha = \dfrac{a}{c}$; косинус $\cos\alpha = \dfrac{b}{c}$; тангенс $\operatorname{tg}\alpha = \dfrac{a}{b}$; катангенс $ctg\,\alpha = \dfrac{b}{a}$.

sin и tg малых углов примерно равны углу в радиальной мере $\sin\alpha \approx tg\,\alpha \approx \alpha$, при $\alpha < 0{,}077$ рад.

Угол α^0	$\sin\alpha$	$\cos\alpha$		Угол α^0	$\sin\alpha$	$\cos\alpha$
0^0	0	1		90^0	1	0
30^0	$\frac{1}{2}$	$\frac{\sqrt{3}}{2}$		180^0	0	-1
45^0	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	$\frac{\sqrt{2}}{2}$		270^0	-1	0
60^0	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	$\frac{1}{2}$		360^0	0	1

$$\cos^2\alpha + \sin^2\alpha = 1$$

10. Проекция вектора $\vec{r}$ на оси x и y



$r_x = r \cdot \cos\alpha$; $r_y = r \cdot \sin\alpha$

a) если $\alpha = 0$, то $(\cos 0° = 1, \sin 0° = 0)$

$r_x = r;\ r_y = 0$

b) если $0 < \alpha < \frac{\pi}{2}$, то $(\sin\alpha > 0;\ \cos\alpha > 0)$

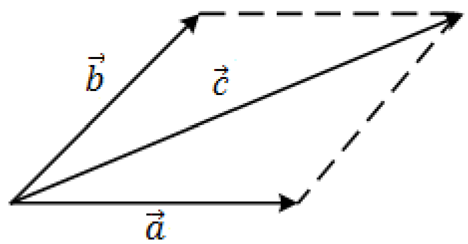
$$r_x > 0\,;\; r_y > 0$$

c) если $\alpha = 90°$, то $(\cos 90° = 0, \sin 90° = 1)$ $r_x = 0$; $r_y = r$,

d) если $\frac{\pi}{2} < \alpha < \pi$, то $(\sin\alpha > 0;\ \cos\alpha < 0)$ $r_x < 0$; $r_y > 0$,

e) если $\alpha = \pi$, то $(\cos\pi = -1,\ \sin\pi = 0)$ $r_x = -r$; $r_y = 0$.

11. Сложение векторов (правило параллелограмма): сумма векторов равна диагонали параллелограмма, построенного на этих векторах.



$$\vec{c} = \vec{a} + \vec{b}$$

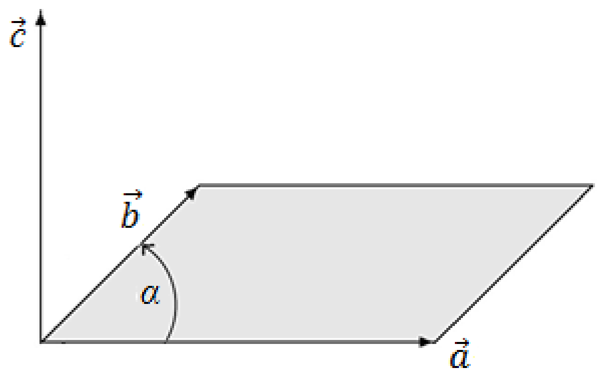
12. Теорема косинусов. Для плоского треугольника со сторонами a, b, c и углом α, противолежащим стороне a, справедливо соотношение:

$$a^2 = b^2 + c^2 - 2 \cdot b \cdot c \cdot cos\alpha.$$

Частный случай – прямоугольный треугольник ($\alpha = 90^0$, $cos90^0 = 0$) $a^2 = b^2 + c^2$ – теорема Пифагора: квадрат гипотенузы равен сумме квадратов катетов.

13. Скалярное произведение двух векторов $\vec{a}$ и $\vec{b}$ – произведение их модулей a и b на косинус угла между ними, т.е. $\vec{a} \cdot \vec{b} = a \cdot b \cdot cos\alpha$ $(0 \leq \alpha \leq \pi)$. Скалярное произведение векторов – величина скалярная.

14. Векторное произведение двух векторов $\vec{a}$ и $\vec{b}$ - вектор $\vec{c}$, направленный перпендикулярно к плоскости в которой лежат вектора $\vec{a}$ и $\vec{b}$, и равный по модулю произведению модулей на синус угла между ними, т.е. $\vec{c} = [\vec{a} \cdot \vec{b}]$; $c = a \cdot b \cdot sin\alpha$



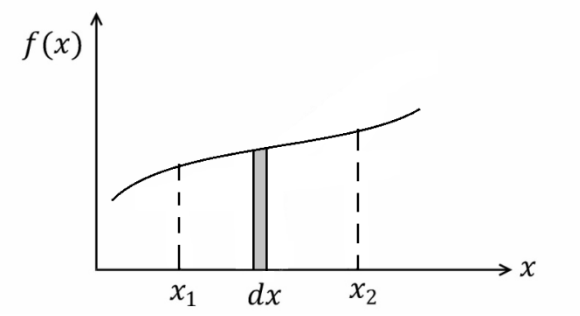
Направление $\vec{c}$ определяется по правилу правого винта: при вращении головки винта от $\vec{a}$ к $\vec{b}$ по наименьшему углу вектор $\vec{c}$ совпадает с направлением движения винта.

15. Производная. Пусть имеется некая функция $f(x)$. Всякое изменение аргумента x на Δx приводит к изменению функции Δf. Величина $\frac{\Delta f}{\Delta \mathrm{x}}$ - средняя скорость изменения функции на интервале значений аргумента от x до $x + \Delta x$. Полезно помнить, что всякое отношение величин разного рода показывает, сколько того, что стоит в числителе, приходится на единицу того, что стоит в знаменателе. Таким образом $\frac{\Delta f}{\Delta x}$ показывает какое изменение функции приходится на единичное изменения аргумента (т.е. если бы $\Delta x = 1$).

Если интервал Δx столь мал, что на нем $f(x)$ линейно зависит от x, то такой интервал обозначается dx и называется элементарным или малым. Малое изменение величины dx и соответствующее малое (элементарное) изменение функции df называются дифференциалами от величины x и f.

Величина $f' = \frac{df}{dx}$ называется производной от функции f по ее аргументу x, а ее смысл –«мгновенная» скорость изменения функции.

16. Интеграл. Пусть имеется некоторая функция $f(x)$, заданная в интервале аргумента x от x_1 до x_2. Разбивая интервал $(x_2 - x_1)$ на интервалы Δx, в пределах которых $f(x)$ существенно не меняется, можно образовать сумму $\sum_{i=1}^{N} f(x_i) \cdot \Delta x_i$. Если Δx_i столь малы, что на каждом из таких интервалов $f(x)$ не изменятся ($f(x)$=const), то эту сумму принято обозначать символом $\int_{x_2}^{x_1} f(x)\,dx$ и называть определенным интегралом от функции $f(x)$ на интервале от x_1 до x_2. Из рисунка видно, смысл этого интеграла - площадь под кривой $f(x)$.



17. Градиент ($\overrightarrow{grad}$) – векторная величина, характеризующая быстроту изменения любой функции; направлен градиент от большего значения функции к меньшему.

18. Решение квадратного уравнения

$$ax^2 + bx + c = 0$$

$$x_{1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

19. Размеры геометрических фигур

- Длина окружности $l = 2\pi R$.
- Площадь круга $S_{кр} = \pi R^2$.
- Площадь поверхности шара $S_ш = 4\pi R^2$.
- Объем шара $V_ш = \frac{4}{3}\pi R^3$, где $\pi = 3{,}14$, $R -$ радиус.
- Площадь прямоугольника $S = a \cdot b$, где a и b – длины сторон.
- Длина дуги окружности $l = \varphi \cdot R$, где φ – центральный угол, опирающийся на дугу l; R – радиус окружности.

Признаки равенства углов:

а) острые углы со взаимно перпендикулярными сторонами равны;

б) накрест лежащие углы равны.

20. Основные физические единицы измерения системы СИ (практическая международная система единиц):

Метр (м) – длина, равная 1650763,73 длины волны в вакууме излучения, соответствующего переходу между уровнями $2p_{10}$ и $5d_5$ атома криптона – 86.

Килограмм (кг) – единица массы – представлен массой международного эталона массы.

Секунда (с) – время равное 9192631770 периодам излучения, соответствующего переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия – 133.

Ампер (А) – сила постоянного тока, который при прохождении по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малой площади поперечного сечения, расположенным в вакууме на расстоянии 1 м один от другого, вызвал бы на каждом участке проводника длиной 1 м силу взаимодействия, равную $2 \cdot 10^{-7}\ H$.

Кельвин (К) – единица температуры, равная 1/273,16 термодинамической температуры тройной точки воды.

Моль – количество вещества системы, содержащей столько же структурных элементов, сколько содержится атомов в углероде – 12 массой 0,012 кг.

21. Кратные и дольные приставки.

Приставка	Числовое значение	Обозначение	Приставка	Числовое значение	Обозначение
кило мега гига	10^3 10^6 10^9	к М Г	нано микро милли	10^{-9} 10^{-6} 10^{-3}	н мк м

22. Буквы греческого алфавита

Обозначение буквы	Названи е		Обозначен ие букв	Название
α	альфа		ν	Ню
β	бета		ξ	кси
γ	гамма		π	пи
δ	дельта		ρ	ро
ε	эпсилон		σ	сигма
η	эта		τ	тау
λ	лямда		ψ	пси
æ	каппа		φ	фи
μ	мю		ω	омега

23. Буквы латинского алфавита.

Обозначение буквы	Название		Обозначение буквы	Название
Aa	а		Nn	эн
Bb	бе		Oo	о
Cc	се		Pp	пэ
Dd	де		Qq	ку
Ee	е		Rr	эр
Ff	эф		Ss	эс
Gg	ге		Tt	тэ
Hh	аш		Uu	у
Ii	и		Vv	ве
Kk	ка		Xx	икс
Ll	эль		Yy	игрек
Mm	эм		Zz	зет

ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ЭЛЕМЕНТОВ Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА

ГРУППЫ

ПЕРИОДЫ	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
2	Li 3 6,941 ЛИТИЙ	Be 4 9,01218 БЕРИЛЛИЙ	B 5 10,811 БОР	C 6 12,011 УГЛЕРОД	N 7 14,0067 АЗОТ	O 8 15,9994 КИСЛОРОД	F 9 18,9984 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	21 Sc 44,95591 СКАНДИЙ	22 Ti 47,88 ТИТАН	23 V 50,9415 ВАНАДИЙ	24 Cr 51,9961 ХРОМ	25 Mn 54,938 МАРГАНЕЦ	26 Fe 55,847 ЖЕЛЕЗО; 27 Co 58,9332 КОБАЛЬТ; 28 Ni 58,69 НИКЕЛЬ
	29 Cu 63,546 МЕДЬ	30 Zn 65,39 ЦИНК	Ga 31 69,723 ГАЛЛИЙ	Ge 32 72,59 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	39 Y 88,9058 ИТТРИЙ	40 Zr 91,22 ЦИРКОНИЙ	41 Nb 92,9064 НИОБИЙ	42 Mo 95,94 МОЛИБДЕН	43 Tc [98] ТЕХНЕЦИЙ	44 Ru 101,07 РУТЕНИЙ; 45 Rh 102,905 РОДИЙ; 46 Pd 106,42 ПАЛЛАДИЙ
	47 Ag 107,8682 СЕРЕБРО	48 Cd 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	57 La* 138,9055 ЛАНТАН	72 Hf 178,49 ГАФНИЙ	73 Ta 180,9479 ТАНТАЛ	74 W 183,85 ВОЛЬФРАМ	75 Re 186,207 РЕНИЙ	76 Os 190,2 ОСМИЙ; 77 Ir 192,22 ИРИДИЙ; 78 Pt 195,08 ПЛАТИНА
	79 Au 196,9665 ЗОЛОТО	80 Hg 200,59 РТУТЬ	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	89 Ac** [227] АКТИНИЙ	104 Rf [261] РЕЗЕРФОРДИЙ	105 Db [262] ДУБНИЙ	106 Sg [265] СИБОРГИЙ	107 Bh [261] БОРИЙ	108 Hs [265] ХАССИЙ; 109 Mt [266] МЕЙТНЕРИЙ; 110 Ds [271] ДАРМШТАДТИЙ

Символ — H; Порядковый номер — 1; Относительная атомная масса — 1,00794; Название — ВОДОРОД

VIII б

* ЛАНТАНОИДЫ

Ce 58 140,12 ЦЕРИЙ	Pr 59 140,908 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 ЛЮТЕЦИЙ		

** АКТИНОИДЫ

Th 90 232,0381 ТОРИЙ	Pa 91 [231] ПРОТАКТИНИЙ	U 92 238,0289 УРАН	Np 93 [237] НЕПТУНИЙ	Pu 94 [244] ПЛУТОНИЙ	Am 95 [243] АМЕРИЦИЙ	Cm 96 [247] КЮРИЙ	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 [262] ЛОУРЕНСИЙ		

В квадратных скобках приведены значения массового числа наиболее устойчивого изотопа данного элемента.