

Готовимся к экзамену

по физике

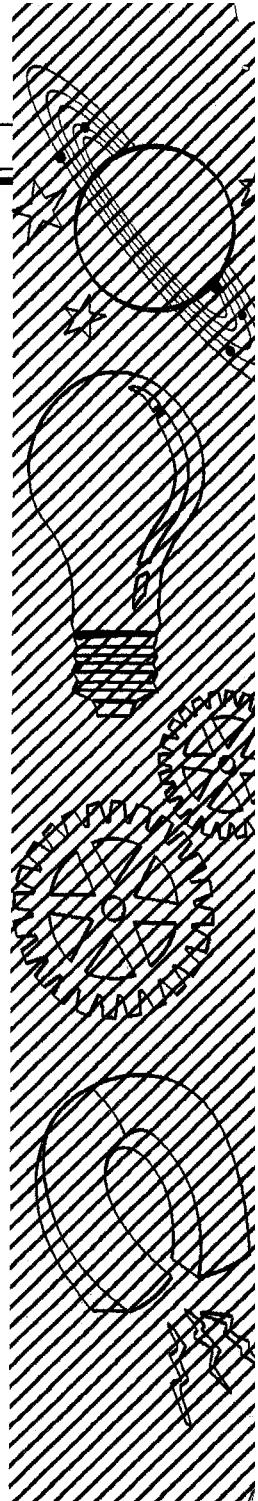
в 2 частях

1
часть

Составители:
Евменов Василий Васильевич
Лазаренко Николай Иванович

Мозырь
ООО ИД «Белый Ветер»
2006

справочник



УДК 372.853(075.3)

ББК 74.265.1

С74

Серия основана в 2006 году

Р е ц е н з е н т ы :

зав. отд. естественно-математического образования УО «Минский гор. гос.

ин-т повышения квалификации и переподгот. кадров образования»,

учитель физики высш. категорий гимназии № 1 им. Ф. Скорины

В. Н. Поддубский;

учитель физики 1 категории УО «Новополоцкий гос. лицей»

Л. В. Тучинская

C74 **Справочник по физике : в 2 ч. Ч. 1 / сост.: В. В. Евменов, Н. И. Лазаренко. — Мозырь : ООО ИД «Белый Ветер», 2006. — 135, [1] с. : ил. — (Готовимся к экзамену).**

ISBN 985-486-698-X (часть 1).

ISBN 985-486-700-5.

Издание включает справочные материалы по всем разделам школьного курса физики, соответствующие требованиям действующей программы. Отличительной особенностью справочника является включение тестов для контроля знаний, наличие ответов.

Адресуется учащимся средних общеобразовательных школ, абитуриентам, учителям.

УДК 372.853(075.3)

ББК 74.265.1

Справочное издание

Готовимся к экзамену

СПРАВОЧНИК ПО ФИЗИКЕ

В 2 частях

Часть 1

Составители :

ЕВМЕНОВ Василий Васильевич, ЛАЗАРЕНКО Николай Иванович

Ведущий редактор *И. А. Доманчук*. Редактор *Н. Ю. Майборода*

Художник *Е. Н. Рогова*. Художник обложки *Е. Н. Рогова*

Компьютерная верстка *Н. Ю. Майборода*

Подписано в печать с оригинал-макета 20.03.2006. Формат 60x84/16. Бумага офсетная № 1. Гарнитура школьная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 7,91. Уч.-изд. л. 7,54. Тираж 400 экз. Заказ 320. ООО ИД «Белый Ветер». ЛИ № 02380/0056758 от 27.01.2004. 247760, г. Мозырь, ул. Советская, 198. Филиал: 220007, г. Минск, ул. Володко, 30, оф. 417. Тел. (017) 224-66-89, 298-50-26, 298-50-27. Отпечатано ризографическим способом печати. ООО ИД «Белый Ветер», 247760, г. Мозырь, ул. Советская, 198. Тел./факс (02351) 2-51-03, 2-51-22. E-mail: belveter@mail.gomel.by

ISBN 985-486-698-X (часть 1)

ISBN 985-486-700-5

© Евменов В. В., Лазаренко Н. И.,
сост., 2006

© ООО ИД «Белый Ветер», 2006

Предисловие

Пособие предназначено для физико-математических лицеев и классов с повышенным и углубленным изучением физики.

В пособие включен конспект лекций, прочитанных авторами учащимся 9—11 классов Гомельского городского лицея № 1, и тесты для контроля знаний по следующим разделам школьного курса физики: «Механика», «Электродинамика», «Колебания и волны», «Оптика».

Каждый тест содержит 10 задач двух типов. В тип А входят семь задач с выбором правильного ответа из пяти предложенных. Три задачи типа В требуют подробного решения с пояснениями и получением правильного ответа. Все тесты рассчитаны на два спаренных урока физики.

Для удобства в приложении приведены основные физические константы и формулы.

1. МЕХАНИКА

Механика — раздел физики, который изучает законо-мерности механического движения и причины, вызывающие или изменяющие это движение.

Механическим движением тела называется изменение его положения в пространстве относительно других тел с течением времени.

Механика делится на три раздела: кинематику, динамику, статику. *Кинематика* изучает движения тел, не рассматривая причин, которые это движение обусловливают. *Динамика* изучает законы движения тел и причины, которые вызывают или изменяют это движение. *Статика* изучает законы равновесия тел.

1.1. Кинематика

1.1.1. Относительность механического движения

Положение любого движущегося тела может быть определено только по отношению к другим телам. В свою очередь, это следует из однородности (все точки пространства равноправны) и изотропности (все направления в пространстве равноправны).

Относительность механического движения проявляется зависимостью от системы отсчета следующих физических величин: вид траектории, перемещение, величина скорости, работы, энергии и т. д.

1.1.2. Система отсчета

Положение тел в пространстве можно определять только по отношению к другим телам. Тело, по отношению к которому определяется положение других тел, называют телом отсчета. Для однозначного указания положения тела в пространстве с телом отсчета связывают систему координат.

1.1. Кинематика

Тело отсчета, связанная с ним система координат, плюс способ измерения времени (часы) составляют систему отсчета.

Такой простейшей системой является прямоугольная (декартова) система координат.

Так как движение происходит во времени, то для его изучения необходимо задать способ измерения времени.

1.1.3. Материальная точка

Материальной точкой называется тело, размерами которого в условиях его движения можно пренебречь.

Понятие материальной точки введено в механике вследствие того, что описать движение реального тела в ряде случаев трудно или неподесообразно.

Пользоваться этим понятием можно в следующих случаях: 1) тело проходит расстояние, значительно превышающее его размеры; 2) движение тела изучается с расстояния, значительно превышающего его размеры; 3) тело движется поступательно.

1.1.4. Траектория

Траекторией называют линию, которую описывает в пространстве движущаяся материальная точка.

Вид траектории зависит от системы отсчета.

1.1.5. Путь и перемещение

Путь — это длина части траектории, пройденной материальной точкой за рассматриваемый промежуток времени.

Перемещение — это вектор, проведенный из начального положения движущейся точки в положение ее в данный момент времени.

Путь — скалярная величина, а перемещение — векторная. В СИ путь и модуль перемещения измеряются в метрах (м).

1. Механика

1.1.6. Скорость

Различные материальные объекты за одно и то же время могут совершать разные перемещения. *Скорость характеризует быстроту перемещения тел в пространстве.* Различают среднюю и мгновенную скорости.

Под средней скоростью понимают отношение перемещения за некоторый промежуток времени к этому промежутку времени: $\langle \bar{v} \rangle = \frac{\Delta s}{\Delta t}$.

Под мгновенной скоростью, или просто скоростью, понимают скорость тела в данный момент времени в данной точке траектории: $\vec{v} = \lim_{t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{s}}{\Delta t}$.

Мгновенная скорость направлена по касательной к траектории.

В технике широкое применение нашло понятие скорости как скалярной величины. В этом случае под скоростью понимается средняя скорость, численно равная отношению пройденного пути за некоторый промежуток времени к этому промежутку времени: $\langle v \rangle = \frac{s}{t}$.

Основной единицей скорости является $1 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

1.1.7. Тест «Равномерное движение»

A1. Автомобиль дважды проехал вокруг Москвы по кольцевой дороге, длина которой 109 км. Чему равны пройденный автомобилем путь l и модуль его перемещения s ?

- 1) $l = 109$ км; $S = 0$;
- 2) $l = 218$ км; $S = 0$;
- 3) $l = S = 218$ км;
- 4) $l = s = 0$;
- 5) $l = 0$; $s = 218$ км.

A2. Камень брошен из окна второго этажа с высоты 8 м, и падает на землю на расстоянии 6 м от стены дома. Чему равен модуль перемещения камня?

- 1) 10 м;
- 2) 9 м;
- 3) 8 м;
- 4) 7 м;
- 5) 6 м.

1.1. Кинематика

A3. По прямому шоссе в одном направлении одновременно начинают двигаться два мотоциклиста. Скорость первого мотоциклиста $v_1 = 10 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Второй догоняет его со скоростью $v_2 = 20 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Известно, что второй мотоциклист догонит первого через $t = 20$ с. На каком расстоянии друг от друга находились мотоциклисты в начальный момент времени?

- 1) 50 м; 3) 150 м; 5) 250 м.
2) 100 м; 4) 200 м;

A4. Эскалатор метро поднимает неподвижно стоящего на нем человека в течение 1 мин. По неподвижному эскалатору человек поднимается за 3 мин. Сколько времени будет подниматься человек по движущемуся эскалатору?

- 1) 30 с; 3) 60 с; 5) 120 с.
2) 45 с; 4) 80 с;

A5. Катер, переправляясь через реку, движется перпендикулярно течению реки со скоростью $4 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ в системе отсчета, связанной с водой. На сколько метров будет снесен катер течением, если ширина реки 800 м, а скорость течения $1 \frac{\text{м}}{\text{с}}$?

- 1) 50 м; 3) 150 м; 5) 250 м.
2) 100 м; 4) 80 м;

A6. Собака убежала от своего хозяина на расстояние 200 м за 16,8 с, а затем за одну треть этого времени пробежала половину пути обратно. Какова средняя скорость пути $\langle v_1 \rangle$ и перемещения $\langle v_2 \rangle$ собаки?

- 1) $v_1 = 13,4 \frac{\text{м}}{\text{с}}, v_2 = 4,5 \frac{\text{м}}{\text{с}}$; 4) $v_1 = 0 \frac{\text{м}}{\text{с}}, v_2 = 17,7 \frac{\text{м}}{\text{с}}$;
2) $v_1 = 4,5 \frac{\text{м}}{\text{с}}, v_2 = 13,4 \frac{\text{м}}{\text{с}}$; 5) $v_1 = 8,9 \frac{\text{м}}{\text{с}}, v_2 = 3,0 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.
3) $v_1 = 17,7 \frac{\text{м}}{\text{с}}, v_2 = 0 \frac{\text{м}}{\text{с}}$;

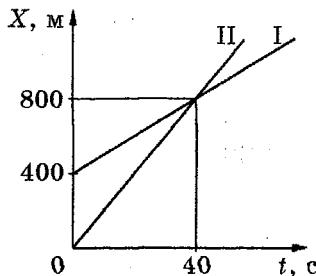
A7. На первой половине маршрута автобус двигался со скоростью в 4 раза большей, чем на второй. Средняя

1. Механика

скорость автобуса на всем пути $32 \frac{\text{км}}{\text{ч}}$. С какой скоростью двигался автобус на первой половине пути?

- 1) $20 \frac{\text{км}}{\text{ч}}$; 3) $60 \frac{\text{км}}{\text{ч}}$; 5) $100 \frac{\text{км}}{\text{ч}}$.
2) $40 \frac{\text{км}}{\text{ч}}$; 4) $80 \frac{\text{км}}{\text{ч}}$;

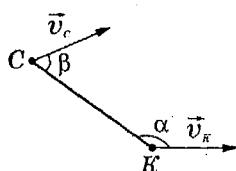
B8. На рисунке приведены графики движения велосипедиста (I) и мотоциклиста (II) в системе отсчета, связанной с землей. Найдите модуль скорости велосипедиста относительно мотоциклиста.



B9. На квалификационных заездах перед финальными соревнованиями велогонщик за 4 круга на велотреке должен показать среднюю скорость пути $\langle v \rangle = 56 \frac{\text{км}}{\text{ч}}$. Средняя скорость на двух первых кругах оказалась равной $\langle v_1 \rangle = 48 \frac{\text{км}}{\text{ч}}$. Какую среднюю скорость нужно развить велосипедисту на последних двух кругах, чтобы выполнить норматив?

B10. Катер, движущийся со скоростью $v = 30 \frac{\text{км}}{\text{ч}}$, буксирует спортсмена на водных лыжах. Трос, за который

держится спортсмен, составляет с направлением движения катера угол $\beta = 150^\circ$. Направление движения спортсмена образует с тросом угол $\alpha = 60^\circ$. Чему равна скорость спортсмена в этот момент времени?



1.1.8. Ускорение

Ускорение характеризует быстроту изменения скорости по модулю и направлению.

Численно ускорение равно изменению скорости в единицу времени. Как и скорость, ускорение векторная величина.

$$\ddot{a} = \frac{D\vec{v}}{Dt} = \frac{\vec{v}_2 - \vec{v}_1}{Dt} \text{ или } \vec{v}_2 = \vec{v}_1 + \ddot{a}Dt.$$

Основной единицей ускорения является $1 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$.

1.1.9. Равномерное и прямолинейное равноускоренное движение

Равномерным прямолинейным движением называют такое движение, при котором тело, двигаясь по прямой линии, за любые равные промежутки времени совершает одинаковые перемещения.

Кинематическое уравнение равномерного движения имеет вид: $\vec{s} = \vec{s}_0 + \vec{v}t$.

В проекции на ось Ox : $x = x_0 + v_x t$.

Прямолинейным равнопеременным движением называют такое движение, при котором при движении по прямой линии за любые равные промежутки времени скорость изменяется на одну и ту же величину.

Кинематическое уравнение равнопеременного движения имеет вид: $\vec{s} = \vec{s}_0 + \vec{v}_0 t + \frac{\ddot{a}t^2}{2}$.

В проекции на ось Ox : $x = x_0 + v_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2}$.

Пройденный путь, ускорение и изменение скорости при равнопеременном движении связаны формулой

$$v_2^2 - v_1^2 = 2as.$$

1. Механика

1.1.10. Тест «Равноускоренное движение»

A1. На поверхность Марса тело свободно падает с высоты 100 м примерно 7 с. С какой скоростью тело коснется поверхности Марса?

1) $14,3 \frac{\text{м}}{\text{с}}$; 3) $44,7 \frac{\text{м}}{\text{с}}$; 5) $6,18 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

2) $28,6 \frac{\text{м}}{\text{с}}$; 4) $13,8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$;

A2. Движение тела описывается уравнением $x = 12 + 6,2t - 0,75t^2$ (м). Определите скорость тела спустя 5 с после начала движения.

1) $1,3 \frac{\text{м}}{\text{с}}$; 3) $2,45 \frac{\text{м}}{\text{с}}$; 5) $6,2 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

2) $-1,3 \frac{\text{м}}{\text{с}}$; 4) $-2,45 \frac{\text{м}}{\text{с}}$;

A3. Какой путь пройдет свободно падающее тело за 6 с падения?

1) 400 м; 2) 360 м; 3) 180 м; 4) 85 м; 5) 55 м.

A4. Тело брошено вертикально вверх со скоростью $20 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Чему равна максимальная высота подъема?

1) 80 м; 3) 40 м; 5) 18 м.
2) 60 м; 4) 20 м;

A5. Пуля, летящая со скоростью $141 \frac{\text{м}}{\text{с}}$, попадает в доску и проникает на глубину 6 см. Определите скорость пули на глубине 3 см, если в доске она двигалась равнозамедленно.

1) $120 \frac{\text{м}}{\text{с}}$; 3) $86 \frac{\text{м}}{\text{с}}$; 5) $50 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

2) $100 \frac{\text{м}}{\text{с}}$; 4) $70 \frac{\text{м}}{\text{с}}$;

A6. С вертолета, находящегося на высоте 30 м, упал предмет. Через какое время предмет достигнет земли, если вертолет опускался со скоростью $5 \frac{\text{м}}{\text{с}}$?

1) 3 с; 2) 2,5 с; 3) 2 с; 4) 1,5 с; 5) 1 с.

1.1. Кинематика

A7. Тело брошено вертикально вверх с начальной скоростью $v_0 = 3 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Когда оно достигло верхней точки полета, из того же пункта с той же начальной скоростью брошено второе тело. На каком расстоянии от точки бросания встретятся тела?

- 1) 0,11 м; 3) 0,34 м; 5) 0,45 м.
2) 0,23 м; 4) 0,39 м;

B8. Двигатель ракеты, запущенной с поверхности Земли, сообщает постоянное ускорение $a = 10 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$, направленное вертикально вверх. Сколько времени должен проработать двигатель, чтобы ракета достигла максимальной высоты $h = 250$ м? Сопротивление воздуха не учитывать.

B9. Два тела брошены из одной точки с одинаковыми скоростями: одно — вертикально вверх, другое — вертикально вниз. Они упали на землю с интервалом времени τ . С какой скоростью были брошены тела? Сопротивление воздуха не учитывать.

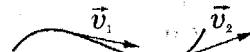
B10. Движения двух тел заданы уравнениями $x_1 = 2t + 0,2t^2$ (м) и $x_2 = 80 - 4t$ (м). Через какое время от начала движения они встретятся, и чему равны их скорости в этот момент?

1.1.11. Движение материальной точки по криволинейной траектории

Движение по криволинейной траектории всегда происходит с ускорением. Ускорение есть даже в том случае, если тело движется равномерно.

Ускорение, обусловленное изменением скорости по модулю, называют касательным (a_ϕ).

Ускорение, обусловленное изменением скорости по направлению, называют центростремительным или нормальным (a_n).



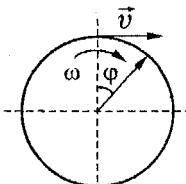
1. Механика

Касательное ускорение в любой точке траектории направлено по касательной к траектории в этой точке в ту сторону, куда направлена скорость. Нормальное ускорение направлено перпендикулярно касательному в сторону центра кривизны траектории в данной точке.

1.1.12. Движение по окружности с постоянной по модулю скоростью

Движение по окружности с постоянной по модулю скоростью является частным случаем криволинейного движения.

При движении тела по окружности различают линейную и угловую скорости.



Линейная скорость — это величина, равная отношению длины дуги, описанной точкой при движении по окружности за некоторый промежуток времени, к величине этого промежутка.

Вектор линейной скорости направлен по касательной к окружности в данной точке.

Угловая скорость — это величина, равная отношению угла поворота радиус-вектора, проведенногоного к движущейся точке из центра вращения, к промежутку времени, за который этот поворот совершен: $\omega = \frac{\phi}{t}$.

Вектор угловой скорости направлен вдоль оси вращения в ту сторону, откуда поворот тела виден происходящим против хода часовой стрелки. Единица угловой скорости — радиан делить на секунду $\left(\frac{\text{рад}}{\text{с}} \right)$.

Связь между линейной и угловой скоростями выражается формулой: $v = \omega \cdot R$.

Период обращения — это время, за которое точка совершает один полный оборот.

Частота обращения — это число оборотов в единицу времени.

1.1. Кинематика

Частота в СИ измеряется в оборотах делить на секунду ($\frac{\text{об}}{\text{с}}$ или с^{-1}). В технике частоту измеряют в оборотах делить на минуту ($\frac{\text{об}}{\text{мин}}$).

Частота v и период T — взаимообратные величины: $T = \frac{1}{v}$.

Связь между угловой скоростью, периодом и частотой:

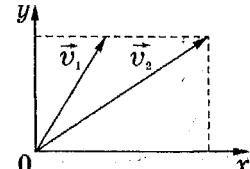
$$\omega = 2\pi v = \frac{2\pi}{T}.$$

Модуль центростремительного (нормального) ускорения определяется по формуле $a_n = \omega^2 R = \frac{v^2}{R}$.

1.1.13. Тест «Криволинейное движение. Движение по окружности»

A1. Два тела брошены с земли под разными углами к горизонту со скоростями v_1 и v_2 так, как показано на рисунке. Какое из тел улетит дальше и приземлится раньше?

- первое тело улетит дальше и приземлится раньше;
- второе тело улетит дальше и приземлится раньше;
- первое улетит дальше и приземлится одновременно со вторым;
- второе улетит дальше и приземлится одновременно с первым;
- оба тела упадут на одинаковом расстоянии и приземлятся одновременно.



A2. Тело брошено горизонтально с высоты $h = 20$ м. Чему равна скорость, с которой тело коснется земли, если траектория его движения описывается уравнением $y = 20 - 0,05x^2$?

1) $5 \frac{\text{м}}{\text{с}}$; 3) $15,3 \frac{\text{м}}{\text{с}}$; 5) $22,4 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

2) $10 \frac{\text{м}}{\text{с}}$; 4) $20 \frac{\text{м}}{\text{с}}$;

1. Механика

A3. Тело, брошенное под углом к горизонту со скоростью $v_0 = 20 \frac{\text{м}}{\text{с}}$, достигло высшей точки траектории через $\phi = 1$ с. Определите дальность полета тела.

- 1) 34,6 м; 3) 28,5 м; 5) 25,6 м.
2) 30,2 м; 4) 26,7 м;

A4. На какую наибольшую высоту поднимется тело, брошенное под углом к горизонту, если время полета равно 8 с?

- 1) 100 м; 3) 60 м; 5) 20 м.
2) 80 м; 4) 40 м;

A5. Под каким углом к горизонту надо бросить тело, чтобы высота подъема была равна половине дальности полета? Сопротивление воздуха не учитывать.

- 1) 30° ; 2) 45° ; 3) 56° ; 4) $63,4^\circ$; 5) 76° .

A6. Камень, брошенный под углом $b = 30^\circ$ к горизонту, дважды был на одной высоте h : спустя время $t_1 = 3$ с и время $t_2 = 5$ с после начала движения. Найдите максимальную высоту h подъема камня.

- 1) 16,7 м; 3) 31,5 м; 5) 80 м.
2) 28,3 м; 4) 42,4 м;

A7. Во сколько раз угловая скорость минутной стрелки часов больше угловой скорости вращения Земли вокруг своей оси?

- 1) в 6 раз; 3) в 12 раз; 5) в 48 раз.
2) в 9 раз; 4) в 24 раза;

B8. Камень брошен с вышки в горизонтальном направлении со скоростью $v_0 = 30 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Определите касательное a_ϕ и нормальное (центростремительное) a_n ускорения камня в конце второй секунды после начала движения.

B9. Самолет летит на высоте $h = 1\ 500$ м со скоростью $200 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Из орудия производят выстрел по самолету в тот момент, когда последний находится на одной вертикали с ору-

1.1. Кинематика

дием. Под каким углом к горизонту следует произвести выстрел, чтобы попасть в самолет? Начальная скорость снаряда $900 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

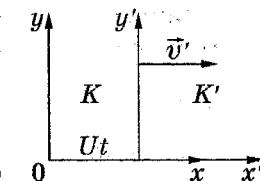
В10. По дуге окружности радиусом $r = 10$ м движется материальная точка. В некоторый момент времени нормальное ускорение точки $a_n = 4,9 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$. Вектор полного ускорения образует в этот момент с вектором нормального ускорения угол $\phi = 60^\circ$. Найдите скорость v и касательное ускорение a_t точки в этот момент.

1.1.14. Принцип относительности Галилея

В современной формулировке *принцип относительности Галилея* читается так: *во всех инерциальных системах отсчета одни и те же механические явления протекают одинаковым образом, и никакими механическими опытами, проводимыми внутри данной инерциальной системы отсчета, невозможно установить, покоятся система отсчета или движется равномерно и прямолинейно.*

Пусть имеется неподвижная система отсчета K и система отсчета K' , движущаяся по отношению к системе K вдоль оси Ox с постоянной скоростью U . Пусть некоторое тело в системе K' движется с постоянной скоростью v относительно этой системы.

Преобразования Галилея имеют вид: $\vec{v} = \vec{U} + \vec{v}'$, $x = x' + v't$, $y = y'$, $t = t'$.



1.2. Динамика

1.2.1. Сила

Различные тела взаимодействуют друг с другом. В процессе взаимодействий тела получают ускорения или деформируются. В этом плане взаимодействия отличаются друг

1. Механика

от друга. Следовательно, их можно измерять. Сила и является мерой взаимодействия тел.

Сила — это векторная величина, характеризующая действие на тело со стороны других тел или полей, в результате которого тело приобретает ускорение или подвергается деформации.

Сила характеризуется числовым значением, направлением в пространстве и точкой приложения. Единица силы — Ньютон $\left(H = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}^2} \right)$. Складываются силы по правилу сложения векторов.

1.2.2. Первый закон Ньютона

Согласно первому закону Ньютона существуют такие системы отсчета, в которых тело, если на него не действуют другие тела, или действие других тел скомпенсировано, сохраняет свою скорость неизменной.

Системы, в которых этот закон выполняется, называют инерциальными, а в которых не выполняется — неинерциальными.

Значение первого закона Ньютона в том, что он позволяет выделять инерциальные системы отсчета.

1.2.3. Масса

Согласно первому закону Ньютона тела могут изменять свою скорость в инерциальных системах отсчета только под воздействием других тел.

Свойство тел изменять свою скорость называют инертностью, а само это явление — инерцией.

Опыты показывают, что при одном и том же взаимодействии различные тела изменяют свою скорость на различную величину. Количественной характеристикой инертности тел является масса.

Масса — это мера инерционных свойств тел (инерционная масса).

В СИ единицей массы служит килограмм (1 кг).

1.2.4. Второй закон Ньютона

На основании наблюдений и опытов Ньютон пришел к выводу, что *ускорение, с которым движется тело, прямо пропорционально результирующей силе, действующей на тело, и обратно пропорционально массе тела: $\vec{a} = k \frac{\vec{F}}{m}$.*

В СИ $k = 1$, поэтому $\vec{F} = m\vec{a}$.

1.2.5. Третий закон Ньютона

Третий закон Ньютона утверждает, что *тела взаимодействуют друг с другом с силами, равными по величине и противоположными по направлению*. Эти силы не уравновешивают друг друга, так как приложены к разным телам: $\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$.

1.2.6. Закон всемирного тяготения

Повседневные наблюдения показывают, что все тела притягиваются к Земле. Все тела во Вселенной притягиваются друг к другу.

Свойство материальных объектов притягивать и притягиваться к другим объектам названо *всемирным тяготением. Силы, которые при этом возникают, получили название гравитационных сил.*

В 1667 г. Ньютон, применив свои законы к движению Луны, пришел к выводу, что две точечные массы взаимодействуют друг с другом с силой, прямо пропорциональной произведению их масс и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними: $F = G \frac{m_1 m_2}{R^2}$, где G — коэффициент пропорциональности — гравитационная постоянная.

Впервые гравитационную постоянную с помощью крутых весов измерил английский физик Кавендиш в 1798 г.:

$$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Н}\cdot\text{м}^2}{\text{кг}^2}.$$

В формуле гравитационного взаимодействия масса получила название *гравитационной массы*, которая характеризует гравитационные свойства тел.

1. Механика

1.2.7. Сила тяжести. Ускорение свободного падения

Силу, с которой Земля притягивает к себе различные тела, называют силой тяжести: $\vec{F} = m\vec{g}$.

В результате действия силы тяжести тело падает на землю с ускорением $g = \frac{F}{m}$.

Так как $F = G \frac{m_r M}{r^2}$, то $g = G \frac{M m_r}{r^2 m_u}$, где M — масса Земли.

Многочисленные опыты показали, что гравитационная масса m_r равна инерционной массе m_u . Поэтому $g = G \frac{M}{r^2}$.

Если тело находится на высоте h над поверхностью Земли, то $g_h = G \frac{M}{(r+h)^2}$ или $g_h = g \frac{r^2}{(r+h)^2}$.

1.2.8. Движение искусственных спутников. Первая космическая скорость

На спутник, движущийся на высоте h над поверхностью земли, действует сила тяготения, которая вызывает центростремительное ускорение. По второму закону Ньютона $G \frac{mM}{(r+h)^2} = \frac{mv^2}{(r+h)}$ или

$$v = \sqrt{G \frac{M}{(r+h)}}$$

Следовательно, если $g_h = G \frac{M}{(r+h)^2}$, то

$$v = \sqrt{g_h(r+h)}$$

Если спутник движется вблизи поверхности Земли, то $v = \sqrt{gr} = 7,9 \frac{\text{км}}{\text{с}}$. Это и будет первой космической скоростью для Земли.

1.2.9. Сила упругости

Все тела состоят из атомов и молекул, которые в твердых телах находятся на определенном расстоянии друг от друга. При взаимодействиях тела изменяют свою форму и размеры. Это явление называют деформацией.

1.2. Динамика

Различают виды деформации: растяжение, сжатие, изгиб, кручение и сдвиг.

При деформациях расстояние между молекулами изменяется, в результате чего между молекулами возникают силы.

Суммарную силу межмолекулярного взаимодействия при деформации называют упругой силой. Природа этой силы электромагнитная.

1.2.10. Закон Гука

На основании опытов английский физик Роберт Гук установил, что в пределах упругих деформаций силы упругости прямо пропорциональны деформации.

Вследствие этого, при растяжении или сжатии имеет место равенство $F_{\text{упр}} = -k\Delta x$, где k — коэффициент пропорциональности, который получил название коэффициент упругости (жесткость). Единица измерения жесткости — Ньютон делить на метр $\left(1 \frac{\text{Н}}{\text{м}}\right)$.

Коэффициент упругости прямо пропорционален площади сечения, обратно пропорционален длине и зависит от материала тела: $k = E \frac{S}{L_0}$.

E — модуль Юнга (зависит от материала). Модуль Юнга измеряется в Паскалях (Па).

1.2.11. Вес тела, движущегося с ускорением по вертикали

Вес тела — это сила, с которой тело вследствие притяжения к Земле действует на опору или растягивает подвес.

Если опора неподвижна, то вес тела $P = mg$.

Если опора движется с ускорением, направленным вертикально вверх, то $P = m(g + a)$.

Если опора движется с ускорением, направленным вертикально вниз, то $P = m(g - a)$.

Из последнего выражения следует, что если тело будет падать вниз с ускорением свободного падения, то его вес будет равен нулю (состояние невесомости).

1. Механика

1.2.12. Сила трения. Коэффициент трения

Сила трения — это сила, возникающая при соприкосновении двух тел и препятствующая их относительному движению.

Для сухого трения различают трение скольжения и трение качения.

При одинаковых условиях, как правило, трение качения меньше трения скольжения.

При движении тела в жидкой или газообразной среде возникают силы сопротивления.

При относительной скорости двух трущихся поверхностей, равной нулю, различают трение покоя. Для твердых тел трение покоя может принимать любые значения: от нуля до некоторого максимального. В жидкой или газообразной среде трения покоя нет.

Опыты показывают, что при сухом трении сила трения прямо пропорциональна силе нормального давления (силе реакции), прижимающей поверхности друг к другу: $F = MN$.

Коэффициент трения m зависит от материала трущихся поверхностей, чистоты их обработки; не зависит от площади поверхностей и в первом приближении от относительной скорости.

Для вязкого трения различают коэффициент сопротивления k , который сложным образом зависит от скорости.

Природа сил трения электромагнитная.

1.2.13. Тест «Динамика прямолинейного движения тел»

A1. Скорость автомобиля меняется по закону $v_x = 0,5t \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Найдите модуль результирующей силы F , действующей на него, если масса автомобиля $m = 1$ т.

- 1) 100 Н; 3) 300 Н; 5) 500 Н.
2) 200 Н; 4) 400 Н;

A2. Под действием силы $F = 8,2$ кН скорость вагона на горизонтальном пути $s = 800$ м возросла от $v_1 = 10 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ до

1.2. Динамика

$v_0 = 30 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Определите коэффициент сопротивления, если масса вагона $m = 1,6 \cdot 10^3$ кг.

- 1) 0,6; 2) 0,5; 3) 0,4; 4) 0,3; 5) 0,2.

A3. С каким ускорением движется брускок по наклонной плоскости с углом наклона к горизонту $\alpha = 30^\circ$ при коэффициенте трения $\mu = 0,2$?

- 1) $1,2 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$; 3) $3,3 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$; 5) $5,1 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$.
 2) $2,4 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$; 4) $4,7 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$;

A4. Для равномерного подъема груза массой $m = 100$ кг по наклонной плоскости с углом наклона $\alpha = 30^\circ$ необходимо приложить силу $F = 600$ Н, направленную вдоль плоскости. С каким ускорением груз будет двигаться вниз, если его отпустить?

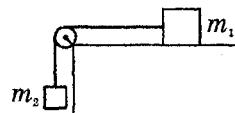
- 1) $1 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$; 2) $2 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$; 3) $3 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$; 4) $4 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$; 5) $5 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$.

A5. Два груза массой $m_1 = 0,3$ кг и $m_2 = 0,2$ кг связаны нитью и лежат на гладком столе. К грузу массой m_1 приложена сила $F_1 = 5$ Н, а к грузу массой m_2 в противоположном направлении — сила $F_2 = 3$ Н. Чему равна сила натяжения нити?

- 1) 2,5 Н; 2) 3 Н; 3) 3,8 Н; 4) 4 Н; 5) 5 Н.

A6. Два груза массой $m_1 = 200$ г и $m_2 = 180$ г соединены легкой нерастяжимой нитью. Коэффициент трения между грузом m_1 и столом $\mu = 0,3$. Найдите силу натяжения нити при движении системы.

- 1) 0,92 Н; 4) 1,63 Н;
 2) 1,23 Н; 5) 1,74 Н.
 3) 1,48 Н;

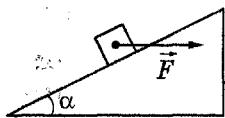


A7. Через неподвижный невесомый блок перекинута легкая нить, к концам которой подвешены грузы массами 2 кг и 3 кг. Найдите ускорение грузов.

- 1) $5 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$; 2) $4 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$; 3) $3 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$; 4) $2 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$; 5) $1 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$.

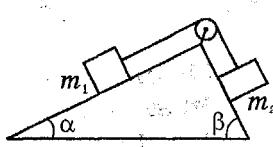
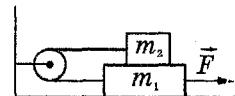
1. Механика

B8. На наклонную плоскость, образующую угол $\alpha = 30^\circ$ с горизонтом, положили груз массой $m = 1$ кг. Коэффициент трения груза о плоскость $m = 0,1$.



Какую горизонтальную силу F необходимо приложить к грузу, чтобы он равномерно перемещался вверх по наклонной плоскости?

B9. На гладком горизонтальном столе лежит брускок массой $m_1 = 2$ кг, на котором находится брускок массой $m_2 = 1$ кг. Оба бруска соединены легкой нитью, перекинутой через невесомый блок. Какую силу F нужно приложить к нижнему брускому, чтобы он начал двигаться с ускорением $a = \frac{g}{2}$? Коэффициент трения между брусками $m = 0,5$.



B10. Найдите силу натяжения нити в системе, показанной на рисунке. Трением пренебречь. Для расчетов принять: $m_1 = 1$ кг, $m_2 = 3$ кг, $\alpha = 30^\circ$, $\beta = 60^\circ$.

1.2.14. Тест «Динамика вращательного движения. Закон всемирного тяготения»

A1. Шарик массой 0,5 кг, привязанный к нити длиной 0,5 м, вращается в вертикальной плоскости, проходя нижнюю точку со скоростью $7 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Найдите силу натяжения нити в этой точке траектории.

- 1) 62 Н; 2) 54 Н; 3) 38 Н; 4) 15 Н; 5) 5 Н.

A2. Определите ускорение свободного падения на Марсе, если вес космонавта на Земле $P_3 = 600$ Н, а на Марсе $P_M = 230$ Н.

- 1) $2,5 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$; 3) $3,8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$; 5) $5,3 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$.
 2) $3,2 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$; 4) $4,6 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$;

A3. Определите скорость автоматической станции, облетающей Луну по круговой орбите вблизи ее поверхности, если гравитационная постоянная $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2}$, а радиус Луны $r = 1,76 \cdot 10^3$ км.

- 1) $1660 \frac{\text{м}}{\text{с}}$; 3) $3780 \frac{\text{м}}{\text{с}}$; 5) $5 \frac{\text{км}}{\text{с}}$.
 2) $2340 \frac{\text{м}}{\text{с}}$; 4) $4250 \frac{\text{м}}{\text{с}}$;

A4. Частота вращения диска в горизонтальной плоскости $n = 36 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$. На расстоянии $R = 25$ см от центра диска положили монету. Каким должен быть минимальный коэффициент трения μ , чтобы монета не была сброшена с диска?

- 1) 0,12; 2) 0,14; 3) 0,21; 4) 0,28; 5) 0,36.

A5. Чему равны сутки на планете, имеющей радиус и массу Земли, но вращающейся вокруг оси с такой скоростью, что вес тела на экваторе равен нулю? Радиус Земли $6,4 \cdot 10^6$ м, ускорение свободного падения — $9,8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$.

- 1) 1,25 ч; 3) 2,5 ч; 5) 3,25 ч.
 2) 1,41 ч; 4) 2,87 ч;

A6. Маленький шарик, подвешенный на невесомой нерастяжимой нити длиной 30 см, вращается в горизонтальной плоскости с периодом обращения 1 с. Нить составляет с вертикалью угол 30° . Определите ускорение свободного падения.

- 1) $9,7 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$; 3) $10 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$; 5) $10,6 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$.
 2) $9,8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$; 4) $10,3 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$;

A7. Период обращения спутника по круговой орбите вокруг Земли 240 мин. Определите высоту орбиты спутника над поверхностью Земли. Радиус Земли $6,4 \cdot 10^6$ м, ускорение свободного падения на поверхности Земли $9,8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$.

1. Механика

- 1) 550 км; 3) 4 800 км; 5) 6 400 км.
2) 1 000 км; 4) 5 200 км;

B8. Найдите среднюю плотность планеты, если на ее экваторе показания динамометра, к которому подвешено тело, на 10 % меньше, чем на полюсе. Продолжительность суток на планете 6 ч (земных).

B9. Шарик массой $m = 100$ г, подвешенный на легкой нити, образующей угол $\beta = 30^\circ$ с вертикалью, лежит на гладкой полусфере радиусом $r = 10$ см. Треугольник AOB

прямоугольный. Шарику сообщили скорость $v = 0,5 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ перпендикулярно плоскости чертежа, и он стал скользить по полусфере, описывая окружность. Чему равна сила давления шарика на полусферу в процессе его движения?

B10. С какой максимальной скоростью может двигаться мотоциклист по треку с углом наклона $\beta = 30^\circ$ к горизонту и радиусом закругления $r = 90$ м, если коэффициент трения $m = 0,4$?

1.3. Законы сохранения

1.3.1. Импульс тела

Из формулы $\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}$, выражающей второй закон Ньютона, можно получить следующее соотношение:

$$\vec{F} = m\vec{a} = m \frac{\vec{v}_2 - \vec{v}_1}{\Delta t} \text{ или } \vec{F} \cdot \Delta t = m\vec{v}_2 - m\vec{v}_1.$$

В последней формуле произведение $\vec{F} \cdot \Delta t$ называют импульсом силы. Импульс силы характеризует действие силы за определенный промежуток времени.

Произведение $m \cdot \vec{v}$ получило название импульса тела. **Импульс тела — это мера механического движения.**

Второй Закон Ньютона читается следующим образом: **при взаимодействии тел изменение импульса тела равно импульсу силы.**

1.3.2. Закон сохранения импульса

В природе все тела взаимодействуют друг с другом. В ряде случаев взаимодействие некоторых тел настолько мало по сравнению с взаимодействиями между другими телами, что им можно пренебречь.

Пусть имеется некоторая система тел, в которой взаимодействие между телами, входящими в эту систему, во много раз больше, чем взаимодействие между телами, не входящими в систему.

Такая система получила название изолированной (замкнутой). Под изолированной системой понимается система тел, в которой действием внешних сил на эту систему можно пренебречь.

Рассмотрим изолированную систему, состоящую из двух тел массами m_1 и m_2 , летящих навстречу друг другу со скоростями \vec{v}_1 и \vec{v}_2 . Пусть после соударения скорости станут равными \vec{v}'_1 и \vec{v}'_2 . В соответствии со вторым и третьим законами Ньютона $\vec{F}_1 = \frac{m_1 \vec{v}'_1 - m_1 \vec{v}_1}{\Delta t}$, $\vec{F}_2 = \frac{m_2 \vec{v}'_2 - m_2 \vec{v}_2}{\Delta t}$, $\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$.

$$m_1 \vec{v}'_1 - m_1 \vec{v}_1 = -m_2 \vec{v}'_2 + m_2 \vec{v}_2 \text{ или } m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 = m_1 \vec{v}'_1 + m_2 \vec{v}'_2.$$

Суммарный импульс тел сохраняется. Если рассматривать не два, а более тел, то и в этом случае суммарный импульс сохранится.

Таким образом, в изолированной системе суммарный импульс тел сохраняется неизменным при всех взаимодействиях тел, составляющих систему:

$$\sum_{i=2}^n m_i \vec{v}_i = \text{const.}$$

Из закона сохранения импульса вытекает закон сохранения центра масс в изолированной системе. Внутренними силами нельзя изменить положение центра масс в пространстве.

1. Механика

1.3.3. Тест «Импульс. Закон сохранения импульса»

A1. Футболист, ударяя мяч массой 0,1 кг, сообщает ему скорость $15 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Длительность удара 0,02 с. Определите среднюю силу удара.

- 1) 75 Н; 3) 55 Н; 5) 35 Н.
2) 65 Н; 4) 45 Н;

A2. Огнетушитель выбрасывает в единицу времени массу пены $\mu = 0,2 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$ со скоростью $v = 20 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Масса полного огнетушителя $m = 2$ кг. Какую силу должен развить человек, чтобы удержать огнетушитель неподвижно в вертикальном положении в начальный момент его работы?

- 1) 4 Н; 3) 20 Н; 5) 20,8 Н.
2) 16,2 Н; 4) 20,4 Н;

A3. Девочка, бегущая со скоростью $4 \frac{\text{м}}{\text{с}}$, догоняет тележку, движущуюся со скоростью $3 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ и вскакивает на нее. Масса девочки 50 кг, масса тележки 80 кг. Чему равна скорость тележки в тот момент, когда девочка вскочила на нее?

- 1) $1,3 \frac{\text{м}}{\text{с}}$; 3) $3,4 \frac{\text{м}}{\text{с}}$; 5) $5,7 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.
2) $2,6 \frac{\text{м}}{\text{с}}$; 4) $4,2 \frac{\text{м}}{\text{с}}$;

A4. Два тела массами $m_1 = 1$ кг и $m_2 = 0,5$ кг движутся навстречу друг другу со скоростями $v_1 = 1 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ и $v_2 = 0,5 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ соответственно. Найдите скорость тел после неупругого столкновения.

- 1) $0,15 \frac{\text{м}}{\text{с}}$; 3) $0,35 \frac{\text{м}}{\text{с}}$; 5) $0,5 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.
2) $0,5 \frac{\text{м}}{\text{с}}$; 4) $0,45 \frac{\text{м}}{\text{с}}$;

A5. Тело массой $m_1 = 1$ кг, имеющее скорость $v_1 = 4 \frac{\text{м}}{\text{с}}$, налетает на покоящееся тело массой $m_2 = 2$ кг и отскакивает

1.3. Законы сохранения

от него со скоростью $v_1 = 3 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ под прямым углом к направлению первоначального движения. Какова скорость тела v_2 ?

- 1) $1,5 \frac{\text{м}}{\text{с}}$; 3) $3,5 \frac{\text{м}}{\text{с}}$; 5) $5 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.
 2) $2,5 \frac{\text{м}}{\text{с}}$; 4) $4,5 \frac{\text{м}}{\text{с}}$;

A6. Снаряд, вылетающий из орудия, разрывается на два одинаковых осколка в наивысшей точке своей траектории на расстоянии l от орудия (по горизонтали). Один из осколков полетел в обратном направлении с той же скоростью, с которой летел снаряд до разрыва. На каком расстоянии от орудия упадет второй осколок?

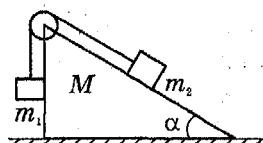
- 1) l ; 2) $2l$; 3) $3l$; 4) $4l$; 5) $5l$.

A7. Молекула массой $5 \cdot 10^{-26}$ кг летит со скоростью $500 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ и ударяется о стенку сосуда под углом 60° и отскакивает от нее под таким же углом и с той же по модулю скоростью. Найдите импульс силы, полученной стенкой при ударе.

- 1) $2,5 \cdot 10^{-23}$ Н·с; 4) $5 \cdot 10^{-24}$ Н·с;
 2) $25 \cdot 10^{-28}$ Н·с; 5) $5 \cdot 10^{-26}$ Н·с.
 3) $5 \cdot 10^{-23}$ Н·с;

B8. Рыбак переходит с носа лодки на корму. Масса лодки 120 кг, масса рыбака 60 кг. На какое расстояние x относительно дна водоема переместится рыбак, если длина лодки $l = 3$ м?

B9. Грузы массами $m_1 = m_2 = 1$ кг, соединенные нерастяжимой нитью, переброшенной через блок, скользят по гладким боковым граням треугольного клина, опирающегося на гладкую горизонтальную плоскость. Найдите перемещение клина по горизонтальной плоскости при опускании груза m_1 на высоту $h = 10$ см.



1. Механика

B10. Человек, стоящий на коньках на гладком льду реки, бросает камень массой $m = 0,5$ кг. Спустя время $t = 2$ с камень достигает берега, пройдя расстояние $s = 20$ м. С какой скоростью v начнет скользить конькобежец, если его масса $m = 60$ кг?

1.3.4. Работа. Мощность

В механике под **работой** понимают скалярную физическую величину, характеризующую действие силы на определенном перемещении. Численно работа равна произведению модуля силы на модуль перемещения и на косинус угла между ними: $A = Fs \cos \theta$. Единица измерения работы — Джоуль (1 Дж).

Одну и ту же работу различные двигатели могут совершить за разное время. **Мощность** характеризует быстроту совершения работы.

Под **мощностью** понимают отношение работы ко времени, в течение которого она была выполнена. Единица измерения мощности — Ватт (1 Вт).

$$P = \frac{A}{\Delta t} = \frac{Fs \cos \theta}{\Delta t} = Fv \cos \theta.$$

1.3.5. Энергия

Физика изучает различные виды движения материи. Причем различные виды движения материи могут переходить друг в друга.

Поскольку возможен такой переход, должна существовать такая мера движения материи, которая была бы применима к любой ее форме. Такой наиболее общей мерой и является **энергия**. Таким образом, **энергия** — это **мера движения материи**.

Движение материи в какой-либо ее форме может быть большим или меньшим. Соответственно энергия может быть большей или меньшей.

Мерой изменения энергии в какой-либо ее форме является работа: $A = E_2 - E_1$. Вследствие этого наиболее полное

1.3. Законы сохранения

определение работы: *работа — это процесс, при котором происходит изменение энергии, и одновременно мера этого изменения.*

В механике различают два вида энергии: кинетическую и потенциальную. Единица измерения энергии — Джоуль (1 Дж).

1.3.6. Кинетическая энергия

Кинетическая энергия — это энергия, которой обладает тело вследствие своего движения.

Пусть тело массой m под действием силы \bar{F} за время t изменило свою скорость по модулю от v_1 до v_2 . Определим, какая при этом была совершена работа.

$$A = FS; F = ma = \frac{m(v_2 - v_1)}{t}; S = \langle v \rangle t = \frac{t(v_2 + v_1)}{2}.$$

$$\text{Но работа — мера изменения энергии: } A = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2}.$$

Поэтому кинетическая энергия $E_k = \frac{mv^2}{2}$.

1.3.7. Потенциальная энергия

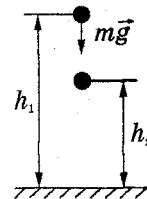
Под потенциальной энергией тел понимают энергию, которой они обладают благодаря взаимному расположению вследствие взаимодействия друг с другом.

1) Потенциальная энергия тела, поднятого над Землей.

$$A = mg(h_1 - h_2) = mgh_1 - mgh_2,$$

$$A = -(mgh_2 - mgh_1), E_p = mgh.$$

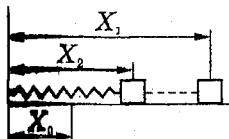
Знак «минус» означает, что в результате действия силы тяжести потенциальная энергия тела в поле тяготения уменьшается.



2) Потенциальная энергия деформированной пружины.

$$A = \langle F \rangle (X_1 - X_2),$$

$$\langle F \rangle = \frac{F_1 + F_2}{2} = \frac{k(X_1 + X_2)}{2},$$



1. Механика

$A = \frac{k(X_1 - X_2)(X_1 + X_2)}{2}$, $A = -\left(\frac{kX_2^2}{2} - \frac{kX_1^2}{2}\right)$. Следовательно, $E_{\Pi} = \frac{kX^2}{2}$.

1.3.8. Тест «Работа. Мощность. Механическая энергия»

A1. Тело массой $m = 1$ кг равномерно поднимается вверх вдоль наклонной плоскости. Угол наклона плоскости к горизонту $\alpha = 30^\circ$. Найдите работу на пути $s = 1$ м силы F , с которой тянут тело, если она направлена параллельно наклонной плоскости, силы тяжести mg , силы реакции опоры N , силы трения, если коэффициент трения тела о плоскость $m = 0,4$.

- 1) $A_N = 0$ Дж; $A_{tp} = 3,46$ Дж; $A_{mg} = -5$ Дж; $A_F = 1,54$ Дж;
- 2) $A_N = 0$ Дж; $A_{tp} = -3,46$ Дж; $A_{mg} = -5$ Дж; $A_F = 8,46$ Дж;
- 3) $A_N = 0$ Дж; $A_{tp} = 5$ Дж; $A_{mg} = 3,46$ Дж; $A_F = -8,46$ Дж;
- 4) $A_N = 2$ Дж; $A_{tp} = -4$ Дж; $A_{mg} = -5$ Дж; $A_F = 9$ Дж;
- 5) $A_N = 0$ Дж; $A_{tp} = 2$ Дж; $A_{mg} = 3$ Дж; $A_F = 6$ Дж.

A2. Какая работа произведена при сжатии буферной пружины железнодорожного вагона на $l_1 = 5$ см, если для сжатия пружины на $l_2 = 1$ см требуется сила $F = 30$ кН?

- 1) 6 250 Дж;
- 2) 5 370 Дж;
- 3) 3 750 Дж;
- 4) 2 480 Дж;
- 5) 1 760 Дж.

A3. Какую работу надо совершить, чтобы заставить автомобиль массой 1,5 т увеличить свою скорость от $36 \frac{\text{км}}{\text{ч}}$ до $72 \frac{\text{км}}{\text{ч}}$? Сопротивлением пренебречь.

- 1) 55 кДж;
- 2) 75 кДж;
- 3) 150 кДж;
- 4) 200 кДж;
- 5) 225 кДж.

A4. Автомобиль массой 1 т трогается с места и, двигаясь равноускоренно, проходит путь 50 м за 5 с. Какую среднюю мощность развивает автомобиль?

- 1) 40 кВт;
- 2) 50 кВт;
- 3) 60 кВт;

1.3. Законы сохранения

- 4) 70 кВт; 5) 80 кВт.

A5. Моторы электровоза при движении его со скоростью $v = 72 \frac{\text{км}}{\text{ч}}$ потребляют мощность $P = 800$ кВт. КПД силовой установки электровоза $\eta = 0,8$. Определите силу тяги моторов.

- 1) 16 кН; 3) 32 кН; 5) 57 кН.
2) 24 кН; 4) 45 кН;

A6. Тело брошено вертикально вверх со скоростью $v_0 = 30 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. На какой высоте h от точки бросания кинетическая энергия тела равна половине его потенциальной энергии на этой высоте?

- 1) 10 м; 2) 15 м; 3) 20 м; 4) 25 м; 5) 30 м.

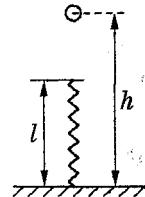
A7. Небольшое тело начинает соскальзывать вниз с вершины закрепленной сферы. На какой высоте h от вершины тело оторвется от поверхности сферы радиусом r ? Трением пренебречь.

- 1) $\frac{1}{3}r$; 2) $0,5r$; 3) $\frac{2}{3}r$; 4) $1,5r$; 5) $\frac{5}{3}r$.

B8. Небольшой шарик, подвешенный на нити, с закрепленным неподвижно вторым концом отвели в сторону так, что нить расположилась горизонтально, и отпустили без начальной скорости. При каком угле нити с вертикалью касательное ускорение шарика будет в два раза большим его нормального ускорения?

B9. Легкая пружина жесткостью $k = 100 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$ и длиной $l = 20$ см стоит вертикально на столе. С высоты $h = 1$ м над столом на нее падает небольшой шарик массой $m = 1$ кг. Какую максимальную скорость будет иметь шарик при своем движении вниз?

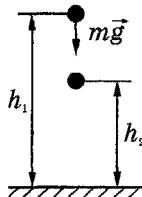
B10. Постоянной силой F поднимают груз массой m на высоту h . Чему равна кинетическая энергия тела в конце подъема?



1. Механика

1.3.9. Закон сохранения энергии в механике

Один вид движения материи может переходить в другой и наоборот. Само движение, как форма существования материи, — неуничтожимо. Поэтому в различных процессах должна сохраняться и ее характеристика — энергия.



Энергия не создается и не исчезает, а лишь передается от одного тела к другому или превращается из одного вида в другой в равных количествах.

Чтобы получить этот закон в механике, рассмотрим систему, состоящую из двух тел.

Работа силы тяжести $A = -(E_{Pi_2} - E_{Pi_1}) = E_{Ki_2} - E_{Ki_1}$, откуда $E_{Pi_1} + E_{Ki_1} = E_{Pi_2} + E_{Ki_2}$.

1.3.10. Тест «Законы сохранения»

A1. Шар массой 3 кг, имевший скорость $4 \frac{\text{м}}{\text{с}}$, испытывает абсолютно неупругий центральный удар с покоявшимся шаром такой же массы. Сколько тепла выделилось при ударе?

- 1) 3 Дж; 3) 9 Дж; 5) 15 Дж.
2) 6 Дж; 4) 12 Дж;

A2. Два тела, массы которых $m_1 = 1$ кг и $m_2 = 2$ кг, движутся во взаимно перпендикулярных направлениях со скоростями $v_1 = 10 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ и $v_2 = 15 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ соответственно. После соударения первое тело остановилось. Какое количество теплоты выделилось при ударе?

- 1) 5 Дж; 3) 15 Дж; 5) 25 Дж.
2) 10 Дж; 4) 20 Дж;

A3. Два тела массами $m_1 = 1$ кг и $m_2 = 2$ кг движутся вдоль горизонтальной прямой навстречу друг другу со скоростями $v_1 = 7 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ и $v_2 = 1 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ соответственно. Найдите

1.3. Законы сохранения

количество выделенной теплоты после абсолютно неупругого удара.

- 1) 42,7 Дж; 3) 26,4 Дж; 5) 18,3 Дж.
2) 37,5 Дж; 4) 21,3 Дж;

A4. Тело массой 3 кг неупруго ударяется о покоящееся тело массой 2 кг. Найдите долю первоначальной кинетической энергии, перешедшей в теплоту.

- 1) 0,1; 2) 0,2; 3) 0,3; 4) 0,4; 5) 0,5.

A5. Тело массой 0,5 кг соскальзывает без трения с клина массой 1 кг, лежащего на гладкой горизонтальной плоскости. Определите скорость тела в тот момент, когда оно сойдет с клина. Первоначально тело находилось на высоте 40 см над горизонтальной плоскостью. Начальная скорость тела равна нулю.

- 1) $1,4 \frac{\text{м}}{\text{с}}$; 3) $3,4 \frac{\text{м}}{\text{с}}$; 5) $5,3 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.
2) $2,3 \frac{\text{м}}{\text{с}}$; 4) $4,7 \frac{\text{м}}{\text{с}}$;

A6. Пуля, летящая горизонтально, попадает в шар, подвешенный на невесомой нерастяжимой нити, и застrevает в нем. Масса пули в 1 000 раз меньше массы шара. Расстояние от центра шара до точки подвеса нити 1 м. Найдите скорость пули до удара в шар, если нить с шаром отклонилась от удара пули на угол 10° .

- 1) $723 \frac{\text{м}}{\text{с}}$; 3) $551 \frac{\text{м}}{\text{с}}$; 5) $335 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.
2) $637 \frac{\text{м}}{\text{с}}$; 4) $450 \frac{\text{м}}{\text{с}}$;

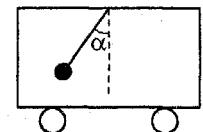
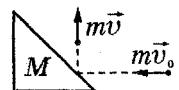
A7. Пуля массой 10 г пробивает ящик, стоящий на гладкой горизонтальной плоскости. Масса ящика в 100 раз больше массы пули. Пуля подлетает к ящику со скоростью $500 \frac{\text{м}}{\text{с}}$, а вылетает из него со скоростью $250 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Начальную и конечную скорости пули считать горизонтальными. Сколько тепла выделилось при движении пули в ящике?

- 1) 938 Дж; 3) 925 Дж; 5) 912 Дж.
2) 934 Дж; 4) 916 Дж;

1. Механика

B8. Пуля попадает в ящик с песком и застревает в нем. На сколько сожмется пружина жесткости k , если пуля имеет массу m и движется со скоростью v , а масса ящика с песком M . Трением между ящиком и горизонтальной плоскостью пренебречь.

B9. Тележка массой m стоит на гладкой горизонтальной плоскости. На тележке укреплен математический маятник, имеющий массу m и длину l . В начальный момент тележка и маятник не подвижны. Маятник отклонили на угол α от вертикали и отпустили без начальной скорости. Найдите скорость тележки в момент, когда маятник проходит через вертикальное положение.



B10. Шарик массой m , летящий со скоростью v_0 , ударяется в призму массой M и после удара движется вертикально вверх. Считая удар абсолютно упругим, найдите скорость шарика сразу после удара. Трением пренебречь.

1.4. Статика

Статика — раздел механики, в котором изучаются тела или системы тел, находящиеся в относительном равновесии.

1.4.1. Момент силы

Опыты показывают, что вращательное действие силы зависит от величины силы и точки ее приложения к врашающемуся телу.

Однозначно характеризует вращательное действие силы момент силы. Под **моментом силы** понимают произведение силы на плечо.

Плечо — это кратчайшее расстояние от линии действия силы до точки или оси, по отношению к которой определяется момент силы.

Момент силы, вращающий тело против часовой стрелки, принято считать положительным, а по часовой — отрицательным. Измеряют момент силы в Ньютонах умножить на метр ($\text{Н} \cdot \text{м}$).

1.4.2. Условия равновесия тела

Тело находится в равновесии, если результирующая сила, действующая на него, равна нулю. Отсюда следуют два условия равновесия:

- 1) сумма проекций всех сил, действующих на тело, относительно любой оси, равна нулю;
- 2) алгебраическая сумма моментов, действующих на тело, по отношению к любой точке пространства или оси равна нулю.

Равновесие может быть устойчивым и неустойчивым. Равновесие устойчиво, если при малом отклонении от положения равновесия тело возвращается в это положение. В противном случае равновесие неустойчиво. Различают еще и безразличное равновесие.

Тело, предоставленное самому себе, всегда стремится занять положение, при котором его потенциальная энергия наименьшая.

1.4.3. Центр тяжести и центр масс тела

На каждую частицу твердого тела действует сила тяжести. Если размеры тела во много раз меньше размеров Земли, то эти силы параллельны друг другу.

Точку приложения суммы сил тяжести, действующих на каждую частицу твердого тела, называют центром тяжести.

Сумма моментов всех сил тяжести, действующих на каждую частицу тела, по отношению к центру тяжести равна нулю.

При поступательном движении все точки твердого тела движутся с одинаковыми скоростями и ускорениями. Следовательно, поступательное движение твердого тела может быть охарактеризовано движением одной точки — центром масс (центром инерции).

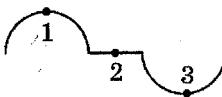
1. Механика

Центром масс системы материальных точек называют точку, координаты которой определяются следующими соотношениями:

$$X = \frac{\sum_{i=1}^n m_i x_i}{\sum_{i=1}^n m_i}, \quad Y = \frac{\sum_{i=1}^n m_i y_i}{\sum_{i=1}^n m_i}, \quad Z = \frac{\sum_{i=1}^n m_i z_i}{\sum_{i=1}^n m_i}.$$

Центр масс и центр тяжести совпадают.

1.4.4. Тест «Элементы статики»



A1. В какой точке на поверхности земли неподвижный мяч будет находиться в положении устойчивого равновесия?

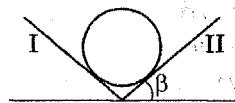
- 1) 1; 3) 3; 5) 2 и 3.
2) 2; 4) 1 и 2;

A2. Нить разрывается, если к одному из концов подвесить груз массой 2 кг. Если к середине тонкой нити подвесить груз той же массы, и затем, взяв концы нити в руки, развести последние так, чтобы угол между обеими частями увеличивался, то нить разорвется при угле, равном...

- 1) 30° ; 2) 60° ; 3) 100° ; 4) 120° ; 5) 145° .

A3. На двух взаимно перпендикулярных плоскостях лежит однородный шар массой 6 кг. Определите давление шара на каждую плоскость, если угол $\beta = 60^\circ$.

- 1) $N_1 = 30$ Н, $N_2 = 52$ Н;
2) $N_1 = 26$ Н, $N_2 = 50$ Н;
3) $N_1 = 22$ Н, $N_2 = 46$ Н;
4) $N_1 = 18$ Н, $N_2 = 42$ Н;
5) $N_1 = 15$ Н, $N_2 = 15$ Н.



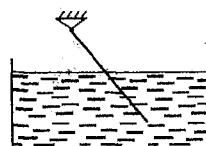
A4. Стержень массой $m = 1,5$ кг и длиной $l = 1$ м одним концом шарнирно прикреплен к потолку. Стержень удерживается в отклоненном положении вертикальным шнуром, привязанным к свободному концу стержня. Найдите

силу натяжения T шнура, если центр масс стержня находится на расстоянии $a = 0,4$ м от шарнира.

- 1) $T = 2\text{Н};$ 3) $T = 6\text{Н};$ 5) $T = 10\text{Н}.$
 2) $T = 4\text{Н};$ 4) $T = 8\text{Н};$

A5. Тонкий однородный цилиндрический стержень верхним концом крепится к шарниру. Снизу под стержень подводится ванна с водой. Стержень наклоняется так, что в воде находится половина его длины. Определите плотность материала стержня. Плотность воды $1\,000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

- 1) $545 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3};$ 4) $950 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3};$
 2) $750 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3};$ 5) $1\,000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$
 3) $870 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3};$

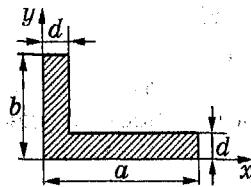


A6. Однородная лестница массой $m = 10\text{ кг}$ упирается в гладкую вертикальную стену и опирается на шероховатый горизонтальный пол. Коэффициент трения лестницы о пол $\mu = 0,6$. Под каким максимальным углом к полу можно поставить лестницу, чтобы по ней мог подняться до верху человек массой $m = 80\text{ кг}$?

- 1) $45^\circ;$ 2) $57,6^\circ;$ 3) $63,8^\circ;$ 4) $75^\circ;$ 5) $81,3^\circ.$

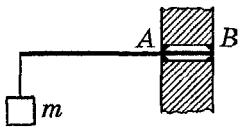
A7. Найдите координаты x_c и y_c центра тяжести неравнобокого уголка, полки которого имеют ширину $a = 50\text{ см}$ и $b = 25\text{ см}$, толщину $d = 5\text{ см}$.

- 1) $x_c = 18,6\text{ см}, y_c = 6,1\text{ см};$
 2) $x_c = 25\text{ см}, y_c = 12,5\text{ см};$
 3) $x_c = 15,2\text{ см}, y_c = 10,5\text{ см};$
 4) $x_c = 18,6\text{ см}, y_c = 13,1\text{ см};$
 5) $x_c = 18,4\text{ см}, y_c = 10,5\text{ см}.$



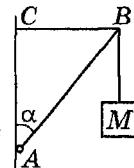
B8. Однородная горизонтальная балка массой 50 кг и длиной $1,5\text{ м}$ закреплена в стене толщиной 50 см так, что

1. Механика

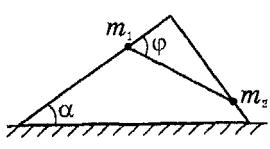


опирается на нее в точках A и B . К свободному концу балки подвешен груз массой 100 кг. Определите силы реакции R_A и R_B в точках A и B .

В9. Кран для подъема тяжестей состоит из балки AB , нижний конец которой соединен со стенкой шарниром A , а верхний удерживается горизонтальной веревкой CB . Определите реакцию в шарнире A , если масса груза $M = 20$ кг, а масса однородной балки $m = 10$ кг, угол $\alpha = 45^\circ$.



В10. Из проволоки изготовлена рама в форме прямоугольного треугольника, которая помещена в вертикальной плоскости так, как показано на рисунке. По проволоке могут скользить без трения связанные нитью грузы массой $m_1 = 0,1$ кг и $m_2 = 0,3$ кг. Найдите силу натяжения нити и угол φ между нитью и длинным катетом треугольника при равновесии системы, если угол $\alpha = 30^\circ$.



массой $m_1 = 0,1$ кг и $m_2 = 0,3$ кг. Найдите силу натяжения нити и угол φ между нитью и длинным катетом треугольника при равновесии системы, если угол $\alpha = 30^\circ$.

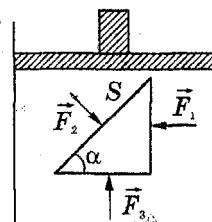
1.4.5. Закон Паскаля

Закон Паскаля гласит, что *давление, производимое на жидкость или газ, передается ими по всем направлениям без изменения.*

$$P_1 = \frac{F_1}{S \sin \alpha}, \quad P_2 = \frac{F_2}{S}, \quad P_3 = \frac{F_3}{S \cos \alpha}.$$

$F_1 = F_2 \sin \alpha$, $F_3 = F_2 \cos \alpha$. Из этих соотношений $P_1 = P_2 = P_3$.

В соответствии с законом Паскаля гидростатическое давление в жидкости на глубине h определяется формулой $P = \rho gh$.



1.4.6. Архимедова сила для жидкости и газов

Наблюдения и опыты показывают, что любое тело, погруженное в жидкость или газ, теряет часть своего веса, т. е. на

него как бы действует выталкивающая сила. Древнегреческий ученый Архимед установил, что *выталкивающая сила направлена вертикально вверх и равна весу вытесненной телом жидкости или газа.*

Эта сила приложена в центре масс вытесненной жидкости.

Мысленно выделим объем жидкости в форме цилиндра. В соответствии с законом Паскаля $F_1 = \rho g h_1 S$, $F_2 = \rho g h_2 S$.

$F_2 - F_1 = \rho g (h_2 - h_1) S = F_A$, или $F_A = \rho g v$ — это и есть сила Архимеда.

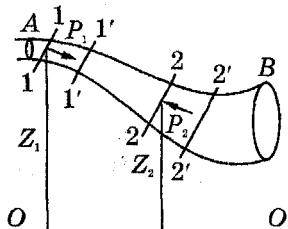
Если тело имеет сложную форму, то его можно разбить на элементарные цилиндры. Тогда

$$F = \rho g (v_1 + v_2 + \dots + v_n) = \rho g v.$$

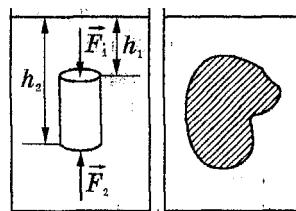
Формально выталкивающую силу можно представить как силу тяжести, действующую на жидкость в объеме тела и имеющую отрицательную массу. Направлена такая сила тяжести вертикально вверх.

1.4.7. Уравнение Бернулли

Рассмотрим элементарную струйку идеальной жидкости при установившемся движении. Выделим сечения 1—1' и 2—2'. Пусть центры тяжести этих сечений характеризуются координатами Z_1 и Z_2 относительно произвольно расположенной плоскости сравнения OO' . Давление в центрах сечений P_1 и P_2 , скорости v_1 и v_2 , площади S_1 и S_2 соответственно.



За малый промежуток времени Δt частицы жидкости из 1—1' перемещаются в 1'—1' на расстояние $v_1 \Delta t$, а частицы из 2—2' — в 2'—2' на расстояние $v_2 \Delta t$.



1. Механика

В сечениях действуют только силы давления и силы тяжести. Работа сил давления: $P_1 s_1 v_1 \Delta t - P_2 s_2 v_2 \Delta t = \Delta Q \Delta t$ ($P_1 - P_2$), где $\Delta Q = v_1 s_1 = v_2 s_2$ — расход жидкости.

Работа сил тяжести равна работе, совершающейся силой тяжести при перемещении на разность высот $Z_1 - Z_2$ массы жидкости, заключенной в объеме между близкими сечениями 1—1 и 1'—1', т. е. $\Delta m g (Z_1 - Z_2) = \rho g S_1 v_1 \Delta t (Z_1 - Z_2) = \rho g \Delta Q \Delta t (Z_1 - Z_2)$.

Приращение кинетической энергии за время Δt равно разности кинетических энергий в сечениях 1—1' и 2—2'. Так как в пределах 1'—2 при установившемся движении кинетическая энергия остается постоянной, то

$$\frac{\Delta m_2 v_2^2}{2} - \frac{\Delta m_1 v_1^2}{2} = \frac{c \Delta Q \Delta t v_2^2}{2} - \frac{c \Delta Q \Delta t v_1^2}{2}.$$

Далее, приравнивая изменение кинетической энергии к работе сил давления и силы тяжести, получаем:

$$c \Delta Q \Delta t \left(\frac{v_2^2}{2} - \frac{v_1^2}{2} \right) = \Delta Q \Delta t (P_1 - P_2) + c g \Delta Q \Delta t (Z_1 - Z_2).$$

$$\text{Откуда } P_1 + c g Z_1 + \frac{c v_1^2}{2} = P_2 + c g Z_2 + \frac{c v_2^2}{2}$$

$$\text{или } P + c g Z + \frac{c v^2}{2} = \text{const.}$$

Это и есть уравнение Бернулли, где P — статическое давление, $c g Z$ — гидравлическое давление, $\frac{c v^2}{2}$ — динамическое давление, сумма $P + c g Z$ — гидростатическое давление.

Таким образом, уравнения Бернулли можно сформулировать так: *в установившемся движении идеальной жидкости полное давление, слагающееся из статического, гидравлического и динамического, одинаково для всех поперечных сечений струйки жидкости.*

1.4.8. Итоговый тест по механике

A1. Определите, на сколько путь, пройденный свободно падающим телом за n -ю секунду, больше пути, пройденного за предыдущую секунду. (Обозначьте ускорение свободного падения через g ; 1 секунду через ϕ .)

1.4. Статика

- 1) $0,5g\tau^2$; 3) $1,5g\tau^2$; 5) $2,5g\tau^2$.
 2) $g\tau^2$; 4) $2g\tau^2$;

A2. Два велосипедиста расположились в противоположных концах диаметра велотрека, представляющего собой окружность радиусом R . Они одновременно начинают двигаться против часовой стрелки. Скорость одного велосипедиста v_1 , а второго $v_2 > v_1$. Через сколько времени второй велосипедист догонит первого?

- 1) $\frac{0,5pR}{v_2 - v_1}$; 3) $\frac{2pR}{v_2 - v_1}$; 5) $\frac{2pR}{v_2 + v_1}$.
 2) $\frac{pR}{v_2 - v_1}$; 4) $\frac{pR}{v_2 + v_1}$;

A3. К грузу массой $m_1 = 7$ кг подвешен на однородной веревке груз массой $m_2 = 5$ кг. Масса веревки $m = 4$ кг. К грузу массой m_1 приложена направленная вертикально вверх сила $F = 190$ Н. Найдите силу натяжения в середине веревки.

- 1) 65,6 Н; 3) 83,1 Н; 5) 106,8 Н.
 2) 74,7 Н; 4) 92,4 Н;

A4. Каково ускорение свободного падения на поверхности Солнца, если его радиус в 108 раз больше радиуса Земли, а плотность солнечной материи в 4 раза меньше плотности Земли. Принять ускорение свободного падения на поверхности Земли равным $9,8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$.

- 1) $236 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$; 3) $255 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$; 5) $265 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$.
 2) $246 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$; 4) $261 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$;

A5. Динамометр вместе с прикрепленным к нему грузом массой 2 кг равномерно вращается в горизонтальной плоскости с частотой 1 Гц. Показание динамометра при этом равно 39,2 Н. Каковым будет показание динамометра, если частоту вращения увеличить до 1,5 Гц? Жесткость пружины динамометра $0,98 \frac{\text{кН}}{\text{м}}$.

1. Механика

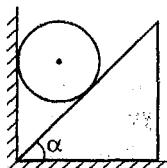
- 1) 53,2 Н; 3) 163,4 Н; 5) 243 Н.
2) 100 Н; 4) 213 Н;

A6. Два груза массами 0,04 кг и 0,01 кг соединены невесомой нитью, перекинутой через неподвижный блок, и расположены на высоте 0,5 м над поверхностью стола. В начальный момент грузы покоятся, затем их отпускают. Какое количество теплоты выделится при ударе первого груза о стол? Удар абсолютно неупругий.

- 1) 0,03 Дж; 3) 0,12 Дж; 5) 0,19 Дж.
2) 0,07 Дж; 4) 0,17 Дж;

A7. Определите время подъема камня массой $m = 1$ кг, брошенного под углом к горизонту, если начальный импульс $p_0 = 10 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}$ в $n = 2$ раза больше импульса тела в верхней точке траектории.

- 1) 1 с; 2) 0,87 с; 3) 0,83 с; 4) 0,79 с; 5) 0,74 с.



B8. На горизонтальном полу лежит клин, вершина которого касается вертикальной стенки. Сверху на клин кладут массивное бревно, масса которого намного больше массы клина. При каком угле α клин не сдвигается с места, если коэффициент трения клина о пол μ ? Трением бревна о стенку и клин можно пренебречь.

B9. На горизонтальной плоскости находится плоскость с углом наклона $\alpha = 30^\circ$. На ней расположен брускок. Коэффициент трения между бруском и наклонной плоскостью $\mu = 0,2$. С каким ускорением a надо двигать наклонную плоскость, чтобы брускок покоялся относительно нее?

B10. Два тела, массы которых $m_1 = 1$ кг и $m_2 = 2$ кг, движутся во взаимно перпендикулярных направлениях со скоростями $v_1 = 10 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ и $v_2 = 15 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ соответственно. После соударения первое тело остановилось. Какое количество теплоты выделилось при ударе?

2. ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

2.1. Электростатика

2.1.1. Электрический заряд и его свойства

По современным представлениям, **электрический заряд является физической величиной, характеризующей интенсивность электромагнитных взаимодействий.**

Под электромагнитными взаимодействиями понимают взаимодействия между электрически заряженными частицами или макроскопическими заряженными телами.

На основании опытов по взаимодействию заряженных тел французский ученый Дюфе (1733 г.) установил, что существуют два вида электрических зарядов. Один из них назвали положительным, а другой — отрицательным. Заряд, которым обладает электрон, называют отрицательным, а заряд протона — положительным.

Разноименные заряды притягиваются, а одноименные отталкиваются. Электрический заряд дискретен, т. е. заряд любого тела составляет целое кратное от элементарного электрического заряда. Единица электрического заряда — кулон (Кл). 1 Кл — заряд, проходящий за 1 секунду через попечное сечение проводника при силе тока в 1 Ампер.

Элементарный электрический заряд $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл. Элементарный заряд впервые был измерен Р. Э. Милликеном в 1909 г.

Точечный заряд — это заряд, сосредоточенный на теле, линейные размеры которого пренебрежимо малы по сравнению с расстоянием до других заряженных тел, с которыми он взаимодействует.

2.1.2. Закон сохранения заряда

Закон сохранения электрического заряда утверждает, что электрические заряды не создаются и не исчезают,

2. Электродинамика

а только передаются от одного тела к другому или перераспределяются внутри данного тела.

Алгебраическая сумма электрических зарядов в электрически изолированной системе есть величина постоянная:

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

Тело электрически нейтрально только в том случае, если число отрицательных зарядов равно числу положительных зарядов.

2.1.3. Электрическое поле

Согласно положениям современной физики, передача взаимодействий между телами не может осуществляться без участия материи.

Электрическим полем называют вид материи, посредством которого осуществляется взаимодействие электрических зарядов, т. е. поле выполняет роль передатчика взаимодействий между заряженными телами.

Понятие электрического поля было введено английским физиком М. Фарадеем. Согласно Фарадею, каждый заряд создает в окружающем пространстве электрическое поле. Поле одного заряда действует на другой заряд и наоборот.

Электрическое поле обладает следующими свойствами:

- 1) материально (обладает импульсом, энергией и т. д.);
- 2) неразрывно связано с электрическим зарядом;
- 3) обнаруживается по действию на электрический заряд.

Поле, создаваемое неподвижными электрическими зарядами, называется электростатическим.

Взаимодействие между зарядами осуществляется не мгновенно, а распространяется с некоторой конечной скоростью. Для вакуума эта скорость $c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

2.1.4. Закон Кулона

Измеряя силу взаимодействия между двумя точечными зарядами с помощью крутильных весов, французский ученик Кулон в 1785 г. установил следующий закон:

2.1. Электростатика

Сила взаимодействия F двух точечных неподвижных зарядов в вакууме прямо пропорциональна произведению величин их зарядов q_1 и q_2 , обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними R и направлена вдоль прямой, соединяющей эти заряды: $F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$.

В СИ коэффициент пропорциональности $k = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}$. Иногда k выражают так:

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}, \text{ где } \epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2} \left(\frac{\Phi}{\text{м}} \right).$$

Закон Кулона справедлив не только для точечных тел, но и для равномерно заряженных сферических тел.

2.1.5. Напряженность электрического поля

Электрическое поле отдельного заряда Q можно обнаружить, если в пространство, окружающее этот заряд, внести другой заряд. Обычно для исследования свойств поля пользуются положительным точечным зарядом, который называют пробным. При этом считают, что пробный заряд не искажает изучаемого поля.

Если в одну и ту же точку поля, созданного зарядом Q , вносить пробные заряды q_1 , q_2 , q_3 и т. д., то на них будут действовать силы F_1 , F_2 , F_3 и т. д. Из закона Кулона следует, что $\frac{F_1}{q_1} = \frac{F_2}{q_2} = \frac{F_3}{q_3}$ и т. д., т. е. для данной точки поля $\frac{F}{q} = \text{const}$. Следовательно, отношением $\frac{F}{q}$ можно количественно характеризовать поле в различных точках.

Физическая величина, равная отношению силы, действующей на положительный пробный заряд, помещенный в данную точку поля, к величине этого заряда, называется напряженностью электрического поля:

$$\bar{E} = \frac{\bar{F}}{q}.$$

Напряженность — силовая характеристика поля. Единица напряженности электрического поля — Вольт делить на метр $\left(1 \frac{\text{В}}{\text{м}} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{Кл}} \right)$.

2. Электродинамика

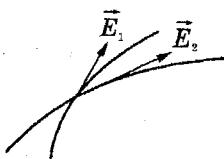
Вектор напряженности электрического поля совпадает по направлению с вектором силы, действующей на пробный положительный заряд, помещенный в данную точку поля.

Напряженность поля точечного заряда (сферы) $E = k \frac{Q}{R^2}$. Внутри сферы напряженность равна нулю.

2.1.6. Силовые линии

Электрическое поле графически удобно изображать силовыми линиями.

Силовыми линиями, или линиями напряженности поля, называют линии, касательные к которым в каждой точке совпадают с вектором напряженности в данной точке поля.



Считают, что силовые линии начинаются на положительных зарядах, а заканчиваются на отрицательных или уходят в бесконечность. По густоте силовых линий судят о напряженности электрического поля.

Силовые линии электростатического поля никогда не могут быть замкнуты сами на себя.

Силовые линии никогда не пересекаются, так как в противном случае вектор напряженности поля в точке пересечения имел бы несколько различных направлений.

2.1.7. Принцип суперпозиции

Напряженность электрического поля системы точечных зарядов в некоторой точке пространства равна геометрической сумме напряженностей полей, созданных в этой точке каждым из этих зарядов в отдельности:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \dots + \vec{E}_n.$$

Принцип суперпозиции означает, что присутствие других зарядов никак не сказывается на поле, создаваемом данным зарядом, т. е. поля существуют независимо друг от друга.

Поле, вектор напряженности которого в каждой точке одинаков по модулю и направлению, называют однородным. Графически однородное поле изображают параллельными

2.1. Электростатика

равноотстоящими друг от друга силовыми линиями. Реализуется это поле вблизи бесконечной заряженной пластины.

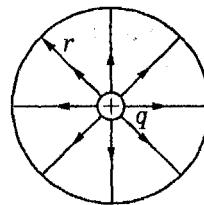
2.1.8. Теорема Гаусса

Теорема позволяет определять напряженность электрического поля, создаваемого системой зарядов.

Окружим заряд q сферой радиусом r . Во всех точках сферы напряженность поля $E = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2}$, или $E \cdot 4\pi r^2 = \frac{q}{\epsilon_0}$.

Так как площадь сферы $S = 4\pi r^2$, то $ES = \frac{q}{\epsilon_0} = \text{const.}$

Произведение ES постоянно, независимо от радиуса сферы. Если окружить любую систему зарядов замкнутой поверхностью, которая всюду перпендикулярна напряженности поля, то это и есть теорема Гаусса: $ES_n = \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{\epsilon_0}$.



П р и м е р. Напряженность поля от бесконечной равномерно заряженной плоскости.



$$E \cdot 2S = \frac{q}{\epsilon_0} \text{ или } E = \frac{q}{2Se_0} = \frac{y}{2e_0}.$$

В последнем выражении $y = \frac{q}{S}$ — поверхностная плотность заряда.

2.1.9. Тест «Закон Кулона. Напряженность электростатического поля»

A1. Два одинаковых металлических шарика заряжены разноименно так, что заряд одного из них в $k = 5$ раз больше заряда другого. Определите, как изменилась сила электростатического взаимодействия шариков после того, как их привели в соприкосновение и раздвинули на расстояние в $n = 2$ раза меньшее, чем первоначальное.

$$1) \frac{F_2}{F_1} = 0,34; \quad 3) \frac{F_2}{F_1} = 1; \quad 5) \frac{F_2}{F_1} = 3,2.$$

$$2) \frac{F_2}{F_1} = 0,04; \quad 4) \frac{F_2}{F_1} = 2,8;$$

2. Электродинамика

A2. Два шарика массой $m_1 = m_0$ и $m_2 = 2m_0$, заряженные разноименными зарядами $q_1 = +100 \text{ нКл}$ и $q_2 = -100 \text{ нКл}$, связаны нитью и находятся на гладкой горизонтальной поверхности. Определите, при каких значениях внешней силы, приложенной к большему шарику и направленной вдоль нити, в процессе движения системы сила натяжения нити отлична от нуля. Расстояние между центрами шариков $r = 9 \text{ см}$.

- 1) $F > 0,01 \text{ Н};$ 3) $F > 0,03 \text{ Н};$ 5) $F > 0,05 \text{ Н}.$
2) $F > 0,02 \text{ Н};$ 4) $F > 0,04 \text{ Н};$

A3. Двум шарикам массой по 10 г каждый, подвешенным в воздухе на тонких непроводящих нитях длиной 1 м каждая, закрепленных в одной точке, сообщили равные одноименные заряды, а в точку подвеса поместили третий шарик, заряженный так же, как и два первых. Определите заряд каждого шарика, если в положении равновесия угол расхождения нитей равен 60° .

- 1) $1 \text{ мкКл};$ 3) $2 \text{ мкКл};$ 5) $3 \text{ мкКл}.$
2) $1,5 \text{ мкКл};$ 4) $2,5 \text{ мкКл};$

A4. Два точечных одноименных заряда q_1 и q_2 находятся на расстоянии l друг от друга. Определите координаты точки, напряженность поля которой $E = 0$, выбрав начало координат в точке нахождения первого заряда и направив ось Ox вдоль прямой, соединяющей их в направлении второго заряда.

- 1) $0,2 \text{ м};$ 3) $0,25 \text{ м};$ 5) $0,4 \text{ м}.$
2) $0,23 \text{ м};$ 4) $0,33 \text{ м};$

A5. Помещенный в масло шар диаметром $d = 1 \text{ см}$, содержащий $n = 1 \cdot 10^{18}$ избыточных электронов, находится там во взвешенном состоянии. Определите напряженность внешнего электростатического поля E , в которое помещен сосуд с маслом, если плотность масла $\rho_1 = 800 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, плот-

2.1. Электростатика

нность вещества шара $\rho_2 = 1500 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, диэлектрическая проницаемость масла $\epsilon = 2,5$.

- 1) $0,25 \frac{\text{МВ}}{\text{м}}$; 3) $0,88 \frac{\text{МВ}}{\text{м}}$; 5) $1,34 \frac{\text{МВ}}{\text{м}}$.
2) $57,3 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$; 4) $1,02 \frac{\text{МВ}}{\text{м}}$;

A6. Металлический шарик радиусом $r = 2$ см и зарядом $+14$ нКл окружен концентрической сферической оболочкой радиусом $r = 5$ см. Определите заряд оболочки, если на расстоянии 6 см от центра шарика напряженность поля равна $16,8 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$.

- 1) $6,5$ нКл; 3) $-1,2$ нКл; 5) $-7,3$ нКл.
2) $1,2$ нКл; 4) $-6,5$ нКл;

A7. Электростатическое поле создано двумя бесконечными параллельными пластинами, поверхностные плотности зарядов которых $y_1 = 1 \frac{\text{нКл}}{\text{м}^2}$ и $y_2 = -3 \frac{\text{нКл}}{\text{м}^2}$. Определите модуль напряженности поля вне пластин.

- 1) $113 \frac{\text{В}}{\text{м}}$; 3) $452 \frac{\text{В}}{\text{м}}$; 5) $1\,234 \frac{\text{В}}{\text{м}}$.
2) $226 \frac{\text{В}}{\text{м}}$; 4) $613 \frac{\text{В}}{\text{м}}$;

B8. На расстоянии r от бесконечной металлической земленной плоскости находится положительный заряд Q . Определите напряженность поля в точке, находящейся на расстоянии r от плоскости и $2r$ от заряда.

B9. Пространство между двумя бесконечно большими параллельными металлическими плоскостями заполнено парафином ($\epsilon = 22$). Определите напряженность поля в парафиине, если поверхностная плотность зарядов на парафиине $y = 6 \frac{\text{мкКл}}{\text{м}^2}$.

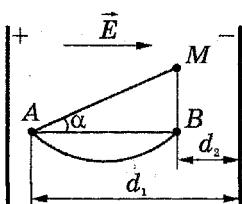
2. Электродинамика

B10. Протон, скорость которого $v_0 = 1\ 000 \frac{\text{м}}{\text{с}}$, влетает в однородное электростатическое поле напряженности $E = 10 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$ в точке с координатами $x_0 = 0, y_0 = 0$. Найдите уравнение траектории, вдоль которой движется протон в поле, если вектор v_0 образует с направлением поля угол $\alpha = 30^\circ$. Силой тяжести пренебречь. Ось x направить по направлению силовых линий поля.

2.1.10. Работа в электростатическом поле

Выясним, от чего зависит работа электрических сил при перемещении заряда с одной точки однородного электростатического поля в другую.

Пусть точечный заряд $+q$ перемещается под действием электрической силы $F = qE$ из точки A в точку B по прямой линии AB . Работа поля $A = F(d_1 - d_2) = qE(d_1 - d_2)$.



Пусть этот же заряд перемещается из точки A в точку B через точку M . В этом случае работа поля $A = F|AM|\cos\beta = = qE(d_1 - d_2)$.

Если заряд будет перемещаться по криволинейной траектории, то эту траекторию можно разбить на ступенчатую с большим числом ступенек. На вертикальных участках работа совершающаяся не будет, так как угол между перемещением и силой будет 90° . Суммарная работа на горизонтальных участках $A = qE(d_1 - d_2)$.

Таким образом, *работа сил электрического поля не зависит от формы пути*. Этот вывод справедлив не только для однородного, но и для неоднородного электрического поля. Так как работа — мера изменения энергии, то электрическое поле обладает энергией.

Очевидно, что работа по замкнутому контуру в электрическом поле равна нулю. *Поля, для которых работа по замкнутому контуру равна нулю, получили название потенциальных.*

2.1.11. Разность потенциалов. Потенциал

Так как работа по перемещению заряда между двумя точками поля прямо пропорциональна величине перенесенного заряда, то отношение работы к величине заряда будет для двух данных точек величиной постоянной. Следовательно, это отношение может служить характеристикой поля.

Величина, равная отношению работы, совершенной полем при перемещении заряда, к этому заряду, получила название разности потенциалов.

Разность потенциалов принято обозначать $\Phi_1 - \Phi_2$ или буквой U : $\Phi_1 - \Phi_2 = U = \frac{A}{q}$.

Разность потенциалов — это энергетическая характеристика поля. Является скалярной величиной.

За единицу разности потенциалов в СИ принимается Вольт (1 В). Разность потенциалов равна 1 В, если при перемещении между двумя точками заряда в 1 Кл поле совершает работу в 1 Дж.

Потенциалом электростатического поля называют разность потенциалов между данной точкой поля и другой, специально выбранной точкой, потенциал которой считают равным нулю.

Так как поле обладает энергией, то согласно другой формулировке, *потенциал — это величина, равная отношению потенциальной энергии заряда в данной точке поля к величине этого заряда.*

Физический смысл имеет только понятие *разность потенциалов*. Это вытекает из-за того, что физически можно измерить работу только при перемещении заряда из одной точки поля в другую.

2.1.12. Потенциал точечного заряда и системы точечных зарядов

Формулу для вычисления потенциала поля точечного заряда q в какой-либо точке можно получить теоретически,

2. Электродинамика

но этот вывод сложен. Потенциал поля определяется по формуле: $\phi = k \frac{q}{r} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q}{r}$.

Потенциал поля от отрицательного заряда будет отрицательным. Приведенная формула справедлива и для сферы при $R \geq r$, где r — радиус сферы. Внутри сферы потенциал такой же, как и на ее поверхности.

Если электрическое поле создается несколькими зарядами, то потенциал поля каждой точки равен алгебраической сумме потенциалов отдельных зарядов.

Потенциальная энергия системы точечных зарядов:

$$W = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \Phi_i q_i.$$

Для двух зарядов $W = k \frac{q_1 q_2}{r} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_1 q_2}{r}$, где r — расстояние между зарядами.

2.1.13. Эквипотенциальная поверхность

Для графического изображения полей кроме силовых линий удобно использовать эквипотенциальные поверхности (линии) равного потенциала.

Эквипотенциальные поверхности — это поверхности, во всех точках которых потенциал имеет одно и то же значение.

Через каждую точку поля проходит только одна силовая линия и только одна потенциальная поверхность. Силовые линии в каждой точке пространства перпендикулярны эквипотенциальной поверхности.

2.1.14. Связь между напряжением и напряженностью для однородного электростатического поля

Разность потенциалов иногда называют напряжением и обозначают буквой U . Для однородного поля $A = q$ ($\Phi_1 - \Phi_2 = qE$) ($d_1 - d_2$), откуда $E = \frac{U}{d}$.

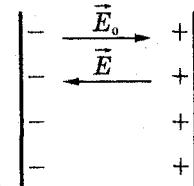
2.1.15. Проводники в электрическом поле

Проводниками называют вещества, по которым могут свободно перемещаться электрические заряды.

Если проводник поместить в электрическое поле E_0 , то внутри проводника произойдет перераспределение зарядов. Возникшее при этом поле \tilde{E} будет компенсировать внешнее поле, в результате чего напряженность внутри проводника станет равной нулю.

Явление перераспределения зарядов в проводнике во внешнем электрическом поле называют электростатической индукцией.

У всех проводников, помещенных в электростатическое поле, разность потенциалов между любыми двумя точками на поверхности проводника равна нулю, т. е. все поверхностные точки проводника имеют одинаковый потенциал.



2.1.16. Диэлектрики в электрическом поле

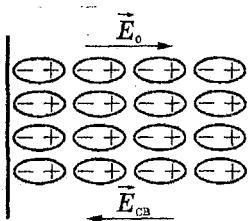
Диэлектрики — это вещества, в которых практически отсутствуют свободные электрические заряды.

Различают следующие виды диэлектриков:

- 1) неполярный диэлектрик, состоящий из молекул (атомов), у которых центры распределения положительных и отрицательных зарядов совпадают;
- 2) полярный диэлектрик, состоящий из молекул, у которых центры распределения положительных и отрицательных зарядов не совпадают;
- 3) сегнетоэлектрики — вещества, имеющие очень большую диэлектрическую проницаемость. У сегнетовой соли она достигает порядка $1 \cdot 10^5$.

При внесении диэлектрика во внешнее электрическое поле E_0 на концах диэлектрика образуются некомпенсированные заряды, которые создают поле $E_{\text{св}}$, направленное против внешнего поля. Таким образом, напряженность поля

2. Электродинамика



в диэлектрике уменьшается по сравнению с полем в вакууме: $\vec{E} = \vec{E}_0 - \vec{E}_{\text{св}}$.

Явление смещения положительных и отрицательных зарядов в противоположные стороны под действием внешнего электрического поля называется поляризацией диэлектрика.

Некомпенсированные заряды, образующиеся на концах диэлектрика, называют поляризованными (связанными).

2.1.17. Диэлектрическая проницаемость

Число, показывающее, во сколько раз уменьшится напряженность электрического поля в диэлектрике по сравнению с вакуумом, называется диэлектрической проницаемостью вещества диэлектрика: $\epsilon = \frac{E_0}{E}$, где $\epsilon \geq 1$.

Вследствие поляризации закон Кулона для взаимодействия точечных зарядов в диэлектрике имеет вид: $F = k \frac{q_1 q_2}{er^2}$.

Формула напряженности от точечного заряда: $E = k \frac{q}{er^2}$.

Формула потенциала от точечного заряда: $\varphi = k \frac{q}{eR}$.

2.1.18. Электроемкость

Возьмем два проводника произвольной формы, разделенных слоем диэлектрика. При сообщении им равных разноименных зарядов между ними возникнет разность потенциалов (напряжение).

Опыты показывают, что при увеличении зарядов в n раз, напряжение увеличивается также в n раз. Отношение $\frac{q}{U}$ для данной пары проводников является величиной постоянной.

Величину $C = \frac{q}{U}$ называют электроемкостью, так как она характеризует способность системы проводников накапливать электрические заряды.

2.1. Электростатика

Понятием электроемкости можно характеризовать и уединенный проводник, считая, что заряды противоположного знака находятся на бесконечности. Под уединенным проводником понимается проводник, который удален от других проводников, тел и зарядов: $C = \frac{q}{\phi}$.

Единица электроемкости — фарада (Φ). Фарада — электроемкость такого проводника, потенциал которого изменяется на 1 вольт при изменении заряда на 1 Кл.

Электроемкость определяется формой и размерами проводника.

2.1.19. Конденсаторы

Конденсатором называют две разноименно заряженные одинаковыми по модулю зарядами пластины (обкладки), разделенные между собой диэлектриком.

Конденсаторы широко применяются в электротехнике и радиотехнике для накопления электрических зарядов и в других целях.

По роду диэлектрика конденсаторы бывают: воздушными, бумажными, слюдяными, керамическими, полистирольными, электролитическими. Конденсаторы могут быть постоянной и переменной емкостей. По виду они подразделяются на плоские, цилиндрические, сферические и т. д. Кроме того, по рабочему напряжению различают: низковольтные (до 100 В) и высоковольтные (свыше 100 В).

2.1.20. Электроемкость плоского конденсатора

По определению электроемкость $C = \frac{q}{U}$. Так как между пластинами плоского конденсатора поле однородное, то $U = Ed$. Напряженность поля между двумя разноименно заряженными одинаковыми по модулю зарядами $E = \frac{\sigma}{\epsilon\epsilon_0} = \frac{q}{\epsilon\epsilon_0 S}$.

Тогда $U = \frac{qd}{\epsilon\epsilon_0 S}$ и $C = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{d}$.

2. Электродинамика

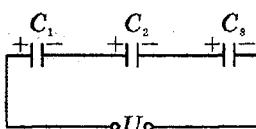
В последней формуле ϵ — диэлектрическая проницаемость среды, ϵ_0 — электрическая постоянная, S — площадь перекрытия пластин конденсатора, d — расстояние между пластинами.

2.1.21. Электроемкость уединенной сферы

По определению электроемкость уединенной сферы $C = \frac{q}{U}$. Потенциал уединенной сферы $U = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 R}$. Следовательно, $C = 4\pi\epsilon_0 R$.

2.1.22. Соединение конденсаторов

1. Последовательное соединение.

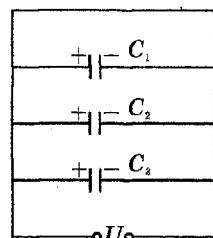


При последовательном соединении заряды на всех конденсаторах одинаковы. Поэтому $q_1 = q_2 = q_3 = q$. Напряжения суммируются, т. е. $U = U_1 + U_2 + U_3$, так как $U = \frac{q}{C}$, то

$$\frac{q}{C} = \frac{q}{C_1} + \frac{q}{C_2} + \frac{q}{C_3} + \dots + \frac{q}{C_n}, \text{ откуда } \frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots + \frac{1}{C_n}.$$

2. Параллельное соединение.

При параллельном соединении напряжение на всех конденсаторах одинаковое: $U_1 = U_2 = U_3 = U$. Заряды суммируются: $q_1 + q_2 + q_3 = q$. $CU = C_1U + C_2U + C_3U$. Общая электроемкость $C = C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_n$.



2.1.23. Энергия электрического поля.

Вычислим энергию конденсатора емкости C и заряженного до напряжения U .

При разряде этого конденсатора будет совершена работа $A = q < U >$.

Так как с уменьшением заряда на конденсаторе в процессе разрядки линейно уменьшается и напряжение, то $< U > = \frac{U}{2}$, тогда $A = \frac{qU}{2}$.

2.1. Электростатика

Работа электрического поля при разрядке конденсатора совершается за счет энергии конденсатора.

Поэтому $W = \frac{qU}{2} = \frac{CU^2}{2} = \frac{q^2}{2C}$. Для плоского конденсатора $C = \frac{\epsilon_0 S}{d}$, $U = Ed$, тогда $W = \frac{\epsilon_0 S E^2 d^2}{2} = \frac{\epsilon_0 E^2}{2} \cdot Sd$. Так как $Sd = V$, где V — объем конденсатора, то $W = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 V$.

Согласно современным представлениям, энергия любого заряженного тела сосредоточена в связанном с ним электрическом поле.

Для плоского конденсатора электрическое поле в основном сосредоточено между его пластинами.

Плотность энергии поля вычисляется по формуле

$$\mathfrak{W} = \frac{W}{V} = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2.$$

2.1.24. Тест «Потенциал. Разность потенциалов. Электроемкость»

A1. Металлическая сфера заряжена положительно. Определите радиус сферы, если потенциал электростатического поля в центре сферы 100 В, а в точке, стоящей на расстоянии 30 см от центра, — 50 В.

- 1) 5 см; 3) 15 см; 5) 25 см.
2) 10 см; 4) 20 см;

A2. Разноименные заряды $q_1 = +20 \text{ нКл}$ и $q_2 = -30 \text{ нКл}$ находятся в воздухе на расстоянии $l = 10 \text{ см}$ друг от друга. Определите потенциал электростатического поля, созданного этими зарядами в точке, находящейся на расстоянии $r_1 = 4 \text{ см}$ от первого заряда и $r_2 = 6 \text{ см}$ от второго заряда.

- 1) 0 кВ; 3) 1 кВ; 5) 2 кВ.
2) -1 кВ; 4) -2 кВ;

A3. Заряды обкладок плоского конденсатора емкостью C равны q и $4q$ соответственно. Определите разность потенциалов $\Delta\varphi$ между обкладками этого конденсатора.

2. Электродинамика

$$1) \Delta\varphi = \frac{3q}{C}; \quad 3) \Delta\varphi = \frac{5q}{C}; \quad 5) \Delta\varphi = \frac{5,5q}{C}.$$

$$2) \Delta\varphi = \frac{3q}{2C}; \quad 4) \Delta\varphi = \frac{5q}{2C};$$

A3. Энергия плоского воздушного конденсатора $W_1 = 0,2 \text{ мкДж}$. Определите энергию W_2 этого конденсатора после того, как пространство между его обкладками заполнили диэлектриком с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 2$, если конденсатор подключен к источнику питания.

- 1) 0,1 мкДж; 3) 0,3 мкДж; 5) 0,5 мкДж.
2) 0,2 мкДж; 4) 0,4 мкДж;

A5. Три одинаковых одноименных точечных заряда $q_1 = q_2 = q_3 = q$ находятся в вершинах равностороннего треугольника со стороной $2a$. Какую работу необходимо совершить, чтобы расположить заряды в одну линию на расстоянии a друг от друга?

$$1) \frac{kq^2}{a}; \quad 2) \frac{kq^2}{2a}; \quad 3) \frac{2kq^2}{a}; \quad 4) \frac{3kq^2}{a}; \quad 5) \frac{3kq^2}{2a}.$$

A6. Два металлических шара с радиусами $r_1 = 10 \text{ см}$ и $r_2 = 5 \text{ см}$, зарженные до потенциалов $\varphi_1 = 20 \text{ В}$ и $\varphi_2 = 10 \text{ В}$, соединяют длинным проводником. Определите потенциал проводника после соединения.

- 1) 15 В; 3) 16,2 В; 5) 17,3 В.
2) 15,8 В; 4) 16,7 В;

A7. Какова работа внешней силы, равномерно перемещающей небольшое тело с зарядом $q = -20 \text{ нКл}$ из точки электростатического поля с потенциалом $\varphi_1 = 700 \text{ В}$ в точку с потенциалом $\varphi_2 = 200 \text{ В}$?

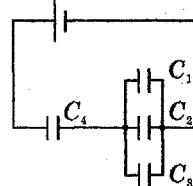
- 1) 14 мкДж; 3) 10 мкДж; 5) 6 мкДж.
2) 12 мкДж; 4) 8 мкДж;

B8. Тонкая проводящая сфера массой $m = 10 \text{ г}$ и радиусом $r = 5 \text{ см}$ разрывается под действием сил электростатического отталкивания, если ее зарядить до потенциала

2.1. Электростатика

$\varphi = 10 \text{ кВ}$. Считая массы осколков сферы одинаковыми, определите их скорость, когда осколки окажутся на расстоянии $x = 15 \text{ см}$ от центра сферы.

B9. Во сколько раз изменится заряд на конденсаторе емкостью C_4 при пробое конденсатора емкостью C_1 ? Емкости конденсаторов равны $C_1 = C_2 = 2 \text{ мкФ}$, $C_3 = C_4 = 4 \text{ мкФ}$.



B10. Двум металлическим шарам с радиусами $r_1 = 0,1 \text{ м}$ и $r_2 = 0,2 \text{ м}$, соединенным длинным тонким проводником, сообщен заряд $Q = 9 \text{ нКл}$. Затем шар радиусом r_1 помещают внутрь металлической заземленной сферы радиусом $r = 3r_1$. Какое количество электричества пройдет при этом по соединительному проводнику?

2.2. Постоянный электрический ток

2.2.1. Электрический ток

Электрическим током называют упорядоченное движение электрических зарядов.

Ток может быть в твердых, жидких, газообразных веществах и в вакууме.

Упорядоченное движение в пространстве заряженных микроскопических объектов называют конвекционным током.

Ток, величина и направление которого с течением времени не изменяется, называется постоянным.

Направление, в котором упорядоченно движутся положительные заряды, принято считать направлением тока.

О наличии электрического тока можно судить по его действиям:

- 1) тепловое;
- 2) химическое;
- 3) магнитное;
- 4) световое.

2. Электродинамика

2.2.2. Условия возникновения электрического тока

Для того чтобы в какой-либо среде существовал электрический ток, необходимо два условия: наличие свободных электрических зарядов и электрического поля, под действием которого заряды пришли бы в движение. Для этого необходим источник тока.

2.2.3. Сила тока

Под силой тока понимают отношение количества электричества, прошедшего через поперечное сечение проводника за некоторый промежуток времени, к этому промежутку времени: $I = \frac{\Delta q}{\Delta t}$.

В СИ единицей тока является Ампер (1 А). Это основная единица, которая определяется экспериментально при помощи силы магнитного взаимодействия параллельных проводников с током.

Отношение тока к площади поперечного сечения проводника, по которому проходит ток, называют плотностью тока: $j = \frac{I}{S}$. Единица измерения тока $\frac{A}{m^2}$. Величину заряда, проходящего через поперечное сечение проводника площадью S за время Δt , можно определить по формуле: $\Delta q = nq_0Sv$, где n — концентрация частиц, q_0 — заряд частицы, v — скорость частицы. Тогда величина тока $I = nq_0Sv$.

2.2.4. Закон Ома для участка цепи. Закон Ома в дифференциальной форме

В 1826 г. немецкий физик Георг Симон Ом экспериментально установил, что сила тока на участке металлического проводника прямо пропорциональна напряжению на этом участке: $I = gU = \frac{U}{R}$.

В формуле, выражающей закон Ома, g — коэффициент пропорциональности — получил название проводимость. Единицей проводимости является Сименс (См). R — сопротивление. Единица измерения сопротивления — Ом (1 Ом).

2.2. Постоянный электрический ток

Величину $U = IR$ называют падением напряжения на сопротивлении R . $j = \frac{I}{S} = \frac{U}{RS} = \frac{U}{\rho l} = \frac{E}{\rho}$, откуда $\bar{j} = g\bar{E}$.

2.2.5. Сопротивление

Опыты показывают, что один и тот же источник, в зависимости от подключенной к нему нагрузки, создает в цепи ток различной силы, т. е. различные проводники оказывают току разное сопротивление.

Электрическим сопротивлением называют свойство проводника ограничивать ток в цепи.

При неизменной температуре сопротивление металлических проводников R прямо пропорционально их длине l , обратно пропорционально площади поперечного сечения S и зависит от природы материала проводника: $R = \rho \frac{l}{S}$, где ρ — удельное сопротивление.

Удельное сопротивление численно равно сопротивлению проводника единичной длины и единичной площади поперечного сечения (Ом · м).

Удельное сопротивление металлического проводника зависит линейно от температуры: $\rho = \rho_0(1 + \alpha \cdot \Delta t)$, где ρ_0 — удельное сопротивление при 0 °C, $\Delta t = t - t_0$ — изменение температуры, α — температурный коэффициент сопротивления, единица измерения — 1 делить на Кельвин (K^{-1}).

2.2.6. Последовательное и параллельное соединение проводников

Последовательным называют такое соединение проводников, при котором конец одного проводника соединяют с началом другого, конец другого с началом третьего и т. д.



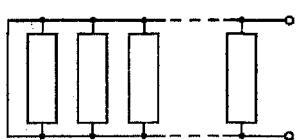
При этом соединении через все сопротивления протекают одинаковые токи. $I_{\text{общ}} = I_1 = I_2 = I_3 = \dots = I_n$. Общее

2. Электродинамика

напряжение равно сумме падений напряжения на отдельных сопротивлениях. $U_{\text{общ}} = U_1 + U_2 + U_3 + \dots + U_n$. Общее сопротивление $R_{\text{общ}} = \frac{U_{\text{общ}}}{I_{\text{общ}}}$.

Поэтому $R_{\text{общ}} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n$.

Параллельным называют такое соединение проводников, при котором начала всех проводников соединяют в одну точку, а концы — в другую.



При этом соединении общий ток $I_{\text{общ}} = I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n$. Напряжение на всех сопротивлениях одинаковое. $U_{\text{общ}} = U_1 = U_2 = U_3 = \dots = U_n$.

Так как сопротивление $R_{\text{общ}} = \frac{U_{\text{общ}}}{I_{\text{общ}}}$,

$$\text{то } \frac{1}{R_{\text{общ}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n}.$$

$$\text{Для двух проводников } R_{\text{общ}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}.$$

2.2.7. Измерение силы и напряжения электрического тока

Сила тока измеряется амперметром, который включается в цепь последовательно. Чтобы амперметр оказывал как можно меньшее влияние на цепь, его сопротивление должно быть небольшим.

Напряжение на участке цепи измеряется вольтметром, который подключают в цепь параллельно участку, на котором измеряют напряжение. Сопротивление вольтметра должно быть как можно большим.

Каждый амперметр и вольтметр рассчитывается на определенную максимальную силу тока и максимальное напряжение.

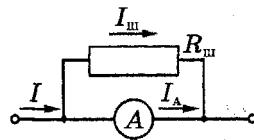
Для увеличения диапазона измерения силы тока к амперметру параллельно подключается сопротивление, которое называется шунтом.

2.2. Постоянный электрический ток

Общий ток $I = I_A + I_{\text{ш}}$. Так как напряжение на шунту и на амперметре одинаковое, то $U = I_A R_A = I_{\text{ш}} R_{\text{ш}}$.

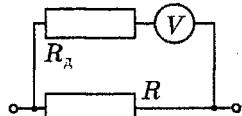
$I_{\text{ш}} = \frac{I_A R_A}{R_{\text{ш}}}$. Сопротивление шунта

$$R_{\text{ш}} = R_A \frac{I_A}{I - I_A}.$$



Для расширения пределов измерения напряжения данного вольтметра последовательно с ним включают добавочное сопротивление. Общее напряжение

$$U = U_V + U_{\Delta}, \quad I_{\Delta} = \frac{U_{\Delta}}{R_{\Delta}} = \frac{U_V}{R_V}.$$



Из этих соотношений следует, что $R_{\Delta} = R_V \left(\frac{U}{U_V} - 1 \right)$.

2.2.8. Работа и мощность постоянного тока

При прохождении по участку цепи электрический заряд совершают работу $A = qU = IUt$.

Если на участке цепи отсутствуют потребители электрической энергии, способные превратить ее в механическую (электродвигатели) или химическую энергию (аккумуляторы), то энергия электрического тока превращается во внутреннюю.

Мощность тока определяется по формуле $P = \frac{A}{t}$.

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

2.2.9. Электродвижущая сила

Необходимым и достаточным условием существования электрического тока в проводнике является наличие свободных электрических зарядов и разности потенциалов на концах проводника. Это может быть только при наличии источника тока.

В любом источнике тока необходимо переносить заряды из одной клеммы в другую, преодолевая действие

2. Электродинамика

электрических сил. Это могут сделать любые силы за исключением электростатических. Силы, которые переносят заряд в источнике тока, получили название сторонних сил. Природа сторонних сил может быть самой различной.

Чем большая работа совершена по разделению зарядов, тем большей величины разделен заряд.

Отношение величины совершенной сторонними силами работы по разделению зарядов к величине разделенных зарядов для данного источника тока есть величина постоянная. Поэтому данное отношение может служить характеристикой источника тока. Эта характеристика получила название электродвижущая сила (ЭДС).

Электродвижущая сила — физическая величина, равная отношению работы сторонних сил по перемещению заряда по замкнутой цепи к величине этого заряда: $\mathcal{E} = \frac{A_{ct}}{q}$.

ЭДС является энергетической характеристикой источника тока. Чем больше ЭДС источника тока, тем большую работу он может совершить на внешнем участке цепи при прочих равных условиях.

2.2.10. Закон Ома для замкнутой цепи. Закон Ома для участка цепи, содержащего ЭДС.

На основании закона сохранения энергии $A_{ct} = A_{внеш} + A_{внутр}$, где A_{ct} — работа сторонних сил, $A_{внеш}$ — работа по преодолению сопротивления на внешнем участке цепи, $A_{внутр}$ — работа по преодолению сопротивления внутри источника тока. Учитывая, что $\frac{A_{ct}}{q} = \mathcal{E}$, $\frac{A_{внеш}}{q} = U_{внеш}$, $\frac{A_{внутр}}{q} = U_{внутр}$, получается $E = U_{внеш} + U_{внутр}$.

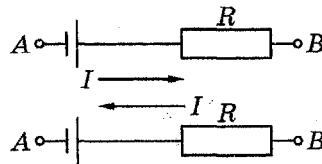
ЭДС источника тока равна сумме падений напряжения на внешнем и внутреннем участках цепи.

Так как $U_{внеш} = IR$, $U_{внутр} = Ir$, то $I = \frac{\mathcal{E}}{R+r}$, где R — сопротивление внешнего участка цепи, r — внутреннее сопротивление источника тока.

2.2. Постоянный электрический ток

$$\Phi_B = \Phi_A + \mathcal{E} - IR.$$

$$\Phi_B = \Phi_A + \mathcal{E} + IR.$$



2.2.11. Законы Кирхгофа

1) Алгебраическая сумма токов в узлах равна нулю:

$$\sum_{i=1}^n I_i = 0.$$

2) Алгебраическая сумма произведений токов на сопротивления в ветвях замкнутого контура равна алгебраической сумме ЭДС, встречающихся в этом контуре:

$$\sum_{i=1}^n I_i R_i = \sum_{i=1}^n \mathcal{E}_i.$$

Для второго правила:

- а) ток, совпадающий с направлением обхода контура, считается положительным;
- б) если при обходе контура внутри источника тока, приходится идти от минуса к плюсу, то ЭДС такого источника считается положительным, в противном случае — отрицательным.

2.2.12. Источники тока

1) Гальванические элементы и аккумуляторы работают за счет химической энергии.

2) Генераторы создают ток за счет механической энергии.

3) Термоэлементы используют энергию теплового движения частиц.

4) Фотоэлементы создают ток за счет энергии света.

Коэффициент полезного действия источника тока

$$\eta = \frac{P_{\text{пол}}}{P_{\text{затр}}} = \frac{R}{R+r}.$$

2. Электродинамика

2.2.13. Тест «Законы постоянного тока»

A1. Определите плотность тока, если за 0,4 с через проводник сечением 1,2 мм² прошло $6 \cdot 10^{18}$ электронов.

- 1) $320 \frac{\text{A}}{\text{м}^2}$; 3) $32 \frac{\text{A}}{\text{мм}^2}$; 5) $0,032 \frac{\text{A}}{\text{мм}^2}$.
2) $2 \frac{\text{A}}{\text{мм}^2}$; 4) $3,2 \frac{\text{A}}{\text{мм}^2}$;

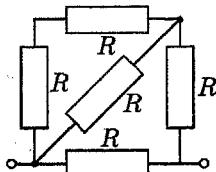
A2. Через железный проводник длиной 50 см пропускают ток 5 А. Разность потенциалов на концах проводника 1,2 В. Определите диаметр проводника. Удельное сопротивление железа $1,2 \cdot 10^{-7}$ Ом · м.

- 1) 0,23 мм; 3) 0,48 мм; 5) 0,73 мм.
2) 0,32 мм; 4) 0,56 мм;

A3. К сети напряжением 120 В присоединяют два резистора. При их последовательном соединении ток в цепи равен 3 А, а при параллельном — 16 А. Чему равны сопротивления резисторов?

- 1) 10 Ом, 30 Ом; 4) 40 Ом, 20 Ом;
2) 15 Ом, 25 Ом; 5) 5 Ом, 15 Ом.
3) 20 Ом, 20 Ом;

A4. Найдите общее сопротивление цепи.



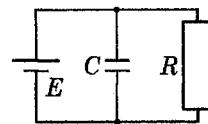
- 1) $75R$; 4) $1,25R$;
2) $0,625R$; 5) $2,48R$.
3) $0,542R$;

A5. Батарея с ЭДС равной 6 В и внутренним сопротивлением $r = 1,4$ Ом питает внешнюю цепь, состоящую из двух параллельных сопротивлений $R_1 = 2$ Ом и $R_2 = 8$ Ом. Найдите силу тока в сопротивлениях.

- 1) $I_1 = 1,6$ А, $I_2 = 0,4$ А; 4) $I_1 = 1,2$ А, $I_2 = 0,8$ А;
2) $I_1 = 1,8$ А, $I_2 = 0,2$ А; 5) $I_1 = 1,5$ А, $I_2 = 0,5$ А.
3) $I_1 = 1,4$ А, $I_2 = 0,6$ А;

2.2. Постоянный электрический ток

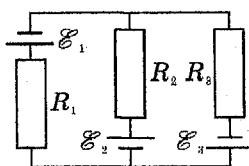
A6. Найдите ЭДС источника тока, если напряженность электрического поля в плоском конденсаторе $E = 2,25 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$. Внутреннее сопротивление источника $R = 0,5 \Omega$, сопротивление резистора $R = 4,5 \Omega$, расстояние между пластинами конденсатора $d = 0,2 \text{ см}$.



- 1) 1 В; 2) 2 В; 3) 3 В; 4) 4 В; 5) 5 В.

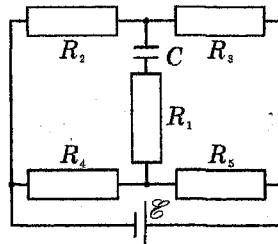
A7. Конденсатор подключен к зажимам батареи. Когда параллельно конденсатору подключили резистор сопротивлением 20Ω , заряд на конденсаторе уменьшился в 1,2 раза. Определите внутреннее сопротивление батареи.

- 1) 1 Ом; 2) 2 Ом; 3) 3 Ом; 4) 4 Ом; 5) 5 Ом.



B8. Найдите силу тока I_1 , I_2 , I_3 на каждом из резисторов, если $\mathcal{E}_1 = 1 \text{ В}$, $\mathcal{E}_2 = 3 \text{ В}$, $\mathcal{E}_3 = 5 \text{ В}$, а сопротивления $R_1 = R_3 = 2 \Omega$ и $R_2 = 4 \Omega$. Внутренним сопротивлением источников пренебречь.

B9. Определите заряд на конденсаторе емкостью $C = 15 \mu\Phi$, если $R_1 = R_3 = R_4 = 12 \Omega$, $R_2 = R_5 = 18 \Omega$. ЭДС источника тока $\mathcal{E} = 7,5 \text{ В}$, внутреннее сопротивление $R = 1 \Omega$.



B10. В среде с большим удельным сопротивлением ρ находится металлический шар радиусом r . Определите ток, стекающий с шара, если его потенциал φ .

2. Электродинамика

2.2.14. Тест «Работа и мощность постоянного тока»

A1. Найдите внутреннее сопротивление и ЭДС источника тока, если при силе тока 30 А мощность во внешней цепи равна 180 Вт, а при силе тока 10 А эта мощность равна 100 Вт.

- 1) 0,1 Ом, 2,5 В; 4) 0,3 Ом, 9 В;
2) 0,2 Ом, 3,5 В; 5) 0,2 Ом, 12 В.
3) 0,6 Ом, 6 В;

A2. Троллейбус массой 11 т движется равномерно со скоростью $36 \frac{\text{км}}{\text{ч}}$. Найдите силу тока в обмотке двигателя, если напряжение в линии 550 В, КПД двигателя и трансмиссии 80 %. Коэффициент сопротивления движению равен 0,02.

- 1) 20 А; 2) 30 А; 3) 40 А; 4) 50 А; 5) 60 А.

A3. Какой длины надо взять никелиновую проволоку сечением $0,84 \text{ мм}^2$, чтобы изготовить нагреватель на 220 В, при помощи которого можно было бы нагреть 2 л воды от 20°C до кипения за 10 мин при КПД равном 80 %? Удельное сопротивление никелина $42 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$, удельная теплоемкость воды $4200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$.

- 1) 69 м; 2) 54 м; 3) 33 м; 4) 27 м; 5) 12 м.

A4. От генератора с ЭДС 250 В и внутренним сопротивлением 0,1 Ом необходимо протянуть к потребителю двухпроводную линию длиной 100 м. Какая масса алюминия пойдет на изготовление подводящих проводов, если максимальная мощность потребителя 22 кВт, и он рассчитан на напряжение 220 В? Плотность алюминия $2700 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, его удельное сопротивление $2,8 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

- 1) 10 кг; 2) 15 кг; 3) 20 кг; 4) 25 кг; 5) 30 кг.

A5. Электромотор питается от сети напряжением $U = 24 \text{ В}$. Чему равна мощность на валу электромотора при протека-

2.2. Постоянный электрический ток

нии по его обмотке тока $I = 8 \text{ A}$, если известно, что при полном затормаживании якоря по цепи идет ток $I_0 = 16 \text{ A}$?

- 1) 24 Вт; 3) 96 Вт; 5) 384 Вт.
- 2) 48 Вт; 4) 192 Вт;

A6. Имеются лампочки 25 Вт и 100 Вт, рассчитанные на одно и то же напряжение. Они соединены последовательно и включены в сеть. В какой из лампочек выделяется большее количество теплоты и во сколько раз?

- 1) в первой в 4 раза; 4) во второй в 16 раз;
- 2) во второй в 4 раза; 5) в обеих одинаковое.
- 3) в первой в 16 раз;

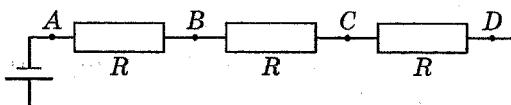
A7. Элемент, ЭДС которого \mathcal{E} и внутреннее сопротивление R , замкнут на внешнее сопротивление r . Наибольшая мощность во внешней цепи $P_{\max} = 9 \text{ Вт}$. Сила тока, текущего при этих условиях по цепи, $I = 3 \text{ А}$. Найдите величины \mathcal{E} и R .

- 1) $\mathcal{E} = 1,5 \text{ В}, R = 0,1 \Omega$; 4) $\mathcal{E} = 6 \text{ В}, R = 1 \Omega$;
- 2) $\mathcal{E} = 2,5 \text{ В}, R = 0,5 \Omega$; 5) $\mathcal{E} = 9 \text{ В}, R = 1,2 \Omega$.
- 3) $\mathcal{E} = 3,5 \text{ В}, R = 1 \Omega$;

B8. Аккумулятор замыкается один раз сопротивлением R_1 , другой раз — R_2 . При этом мощность, выделяемая во внешней цепи, одинаковая. Определите внутреннее сопротивление аккумулятора.

B9. Две электроплитки, включенные в цепь параллельно, потребляют мощность P_1 . Какую мощность P_2 будут потреблять эти электроплитки, включенные последовательно, если одна из электроплиток потребляет мощность P_0 ?

B10. После соединения проводниками точек A и C , B и D тепловая мощность, выделяемая во внешней цепи, осталась неизменной. Найдите внутреннее сопротивление источника тока r , если сопротивление каждого резистора R .



2. Электродинамика

2.3. Магнитное поле постоянного тока

2.3.1. Взаимодействие токов

В 1820 г. датский физик Ханс Кристиан Эрстед обнаружил, что магнитная стрелка, расположенная параллельно прямолинейному проводнику, поворачивается и устанавливается перпендикулярно проводнику, если по нему пропустить ток.

Опыт Эрстеда указал на наличие связи между электрическими и магнитными явлениями.

В дальнейшем было установлено, что постоянный магнит оказывает воздействие на проводник с током.

Французский физик Ампер установил, что если в двух параллельных проводниках ток направлен в одну сторону, то наблюдается взаимное притяжение этих проводников, если токи текут в разные стороны — отталкивание.

Силу взаимодействия, приходящуюся на участок длиной l , между параллельными проводниками можно определить по формуле $F = \frac{\mu_0 I_1 I_2 l}{2\pi d}$, где d — расстояние между проводниками.

Вследствие того, что проводники с током в целом электрически нейтральные, называть их взаимодействие Кулоновским нельзя.

Обобщая опыты, ученые предположили, что вокруг проводников с током существует магнитное поле, посредством которого и взаимодействуют проводники.

Магнитное поле — это одна из сторон электромагнитного поля, главной особенностью которой является то, что оно связано с движущимся зарядом и действует только на движущиеся заряды.

2.3.2. Индукция магнитного поля

Опыты показывают, что на проводник с током величиной I , небольшой длины l , помещенный в магнитное поле, действует сила, прямо пропорциональная произведению силы тока на длину проводника: $F \sim Il$.

2.3. Магнитное поле постоянного тока

Небольшая длина нужна для того, чтобы характеризовать поле в данной точке.

Сила F , действующая на проводник с током в магнитном поле, зависит также от ориентации проводника в поле.

Отношение $\frac{F_{\max}}{Il}$ для данной точки поля величина постоянная. Это отношение определяет модуль вектора магнитной индукции, являющейся силовой характеристикой поля:

$$B = \frac{F_{\max}}{Il}.$$

Единица индукции магнитного поля — тесла (1 Тл).

За направление магнитной индукции в данной точке поля принимается направление, указанное северным полюсом свободной магнитной стрелки.

2.3.3. Силовые линии магнитного поля

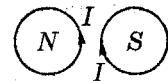
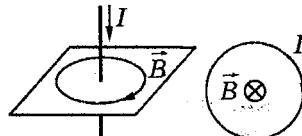
При графическом изображении магнитного поля используют понятие силовой линии как кривой, касательная к которой в каждой точке совпадает с направлением вектора магнитной индукции.

Для определения направления магнитной индукции Джеймс Клерк Максвелл предложил правило буравчика. Вектор магнитной индукции направлен в сторону движения рукоятки буравчика, если сам буравчик движется по направлению тока, с которым связано рассматриваемое поле.

Как свидетельствуют опыты — силовые линии магнитной индукции не имеют ни начала, ни конца. Они всегда замкнуты. Такие поля называются вихревыми.

Для определения полюсов катушки применяют правило часовой стрелки. Северный полюс находится с той стороны катушки, глядя на которую ток в катушке движется против часовой стрелки.

Индукция магнитного поля прямолинейного бесконечно-го проводника с током I на расстоянии r от него в вакууме



2. Электродинамика

определяется по формуле $B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$, где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{А}}$ — магнитная постоянная.

Индукция магнитного поля тока I в центре кругового витка радиусом r в вакууме определяется по формуле $B = \frac{\mu_0 I}{2r}$.

Индукция магнитного поля тока I , проходящего по соленоиду (катушке) внутри него в точке, достаточно удаленной от его концов в вакууме, определяется по формуле $B = \frac{\mu_0 n I}{l}$, где n — число витков обмотки соленоида, l — длина соленоида.

Для магнитного поля справедлив принцип суперпозиции, согласно которому $\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \vec{B}_3 + \dots + \vec{B}_n$.

2.3.4. Сила Ампера

Ампер опытным путем установил, что сила F , действующая на проводник с током величиной I и длиной l , в однородном магнитном поле определяется формулой $F_A = IBl \sin \alpha$, где α — угол между вектором B и направлением тока в проводнике.

Направление силы Ампера определяется правилом левой руки. Левую руку располагают так, чтобы вектор индукции магнитного поля был перпендикулярен ладони, четыре пальца были направлены по направлению тока, тогда отогнутый на 90° большой палец покажет направление силы Ампера.

2.3.5. Сила Лоренца

Сила, действующая на проводник с током в магнитном поле, есть суммарная сила, действующая на каждый движущийся заряд.

Сила, действующая на движущееся в магнитном поле заряженное тело, есть сила Лоренца.

Силу Лоренца F_L можно найти как отношение силы Ампера F_A к числу N заряженных частиц, движущихся в данном проводнике. $N = nSl$, где n — концентрация частиц, S — площадь поперечного сечения проводника, l — длина

2.3. Магнитное поле постоянного тока

проводника. Так как ток $I = qnSv$, то $N = \frac{Il}{qv}$, где v — скорость частиц. Тогда $F_{\text{Л}} = \frac{Bil \sin \alpha \cdot qv}{l} = qvB \sin \alpha$.

α — угол между вектором магнитной индукции и вектором скорости.

Направление силы Лоренца на положительную частицу определяется правилом левой руки. Левую руку располагают так, чтобы вектор индукции магнитного поля был перпендикулярен ладони, четыре пальца были направлены по направлению скорости, тогда отогнутый на 90° большой палец покажет направление силы Лоренца. На отрицательную частицу — противоположно большому пальцу.

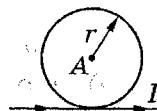
2.3.6. Тест «Магнитное поле. Силы Ампера и Лоренца»

A1. По двум параллельным бесконечно длинным проводникам, находящимся на расстоянии 10 см друг от друга, текут токи противоположного направления величиной 30 А. Определите магнитную индукцию в точке, расположенной посередине между проводниками.

- 1) 0; 3) 240 мкТл; 5) 24 мТл.
2) 120 мкТл; 4) 300 мкТл;

A2. Прямой бесконечный проводник имеет круговую петлю радиусом $r = 80$ см. Определите силу тока в проводнике, если известно, что в точке A магнитная индукция $B = 12,5$ мкТл.

- 1) 4 А; 4) 16 А;
2) 8 А; 5) 20 А.
3) 12 А;



A3. Найдите магнитную индукцию поля в центре соленоида длиной 20 см, содержащего 400 витков, если сила тока в обмотке соленоида 2 А.

- 1) 1 мТл; 3) 3 мТл; 5) 5 мТл.
2) 2 мТл; 4) 4 мТл;

2. Электродинамика

A4. Проводник длиной l и массой m подвешен на тонких проволочках. При прохождении по проводнику тока силой I он отклонился в однородном вертикальном магнитном поле так, что проволочки образовали угол α с вертикалью. Какова индукция поля?

- 1) $\frac{mtg\alpha}{gIl}$; 3) $\frac{Iltg\alpha}{mg}$; 5) $\frac{ltg\alpha}{mgI}$.
2) $\frac{mgtg\alpha}{Il}$; 4) $\frac{mgltg\alpha}{I}$;

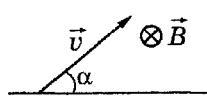
A5. Электрон, ускоренный разностью потенциалов 1 000 В, влетает в однородное магнитное поле, перпендикулярное направлению его движения. Индукция магнитного поля равна 1,19 мТл. Определите радиус кривизны траектории электрона и период обращения его по окружности.

- 1) 9 см, $3 \cdot 10^8$ с; 4) 16 см, $6 \cdot 10^7$ с;
2) 12 см, $2 \cdot 10^8$ с; 5) 20 см, $4 \cdot 10^7$ с.
3) 14 см, $1 \cdot 10^8$ с;

A6. Проводник длиной $l = 30$ см с током силой $I = 20$ А расположен под углом $\alpha = 30^\circ$ к однородному магнитному полю с индукцией $B = 0,4$ Тл. Найдите работу, которая была совершена при перемещении проводника на расстояние $x = 25$ см перпендикулярно магнитному полю.

- 1) 0,1 Дж; 3) 0,3 Дж; 5) 0,5 Дж.
2) 0,2 Дж; 4) 0,4 Дж;

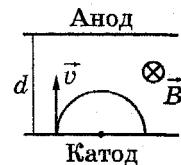
A7. Электрон со скоростью $v = 1\ 000 \frac{\text{см}}{\text{с}}$ влетает под углом $\alpha = 30^\circ$ в область однородного магнитного поля с индукцией $B = 0,001$ Тл. Направление скорости перпендикулярно индукции магнитного поля. Определите максимальную глубину проникновения электрона в область поля.



- 1) $7,6 \cdot 10^{-9}$ м; 4) $4,8 \cdot 10^{-8}$ м;
2) $9,2 \cdot 10^{-9}$ м; 5) $8,5 \cdot 10^{-8}$ м.
3) $1,5 \cdot 10^{-8}$ м;

2.3. Магнитное поле постоянного тока

B8. Между плоским анодом и катодом подается высокое напряжение. Система находится в магнитном поле индукции $B = 0,1$ Тл, которая параллельна электродам. Определите, при каком минимальном напряжении электроны достигнут анода, если расстояние между анодом и катодом $d = 2$ см. Считать, что электроны вырываются из катода с очень маленькой скоростью.



B9. Электрон, движущийся в вакууме со скоростью $v = 1 \cdot 10^6 \frac{\text{м}}{\text{с}}$, попадает в однородное магнитное поле с индукцией $B = 1,2$ мТл под углом $\alpha = 30^\circ$ к силовым линиям поля. Определите радиус винтовой линии, по которой будет двигаться электрон, и ее шаг.

B10. Через какое время после первой встречи произойдет встреча двух заряженных частиц, движущихся перпендикулярно магнитному полю индукции B ? При первой встрече частицы двигались перпендикулярно друг другу. Заряд частиц q , масса m . Взаимодействием пренебречь.

2.3.7. Магнитный поток

Магнитным потоком сквозь некоторый участок поверхности называют произведение магнитной индукции на площадь поверхности и косинус угла между направлением магнитной индукции и нормали к поверхности: $\Delta\Phi = B\Delta S \cos\alpha$.

Для однородного поля $\Phi = BS \cos\alpha$.

В СИ единицей магнитного потока является вебер:

$$[\Phi] = 1 \text{ Вб.}$$

2.3.8. Электромагнитная индукция

После того, как было выяснено, что вокруг проводника с током существует магнитное поле, возник вопрос, а не может ли магнитное поле вызывать электрический ток в проводнике, помещенном в это поле?

В 1831 г. Майкл Фарадей обнаружил, что в замкнутом контуре с помощью изменяющегося магнитного поля можно

2. Электродинамика

создать ЭДС (получить ток) тремя способами: двигая магнит относительно контура, двигая контур относительно магнита, меняя ток в соседнем контуре.

Во всех трех случаях контур пронизывает переменное магнитное поле.

Явление возникновения ЭДС в замкнутом контуре при пронизывании его переменным магнитным полем называют магнитной индукцией.

ЭДС индукции может возникать и в незамкнутом проводнике при его движении в магнитном поле.

2.3.9. Вихревое электрическое поле

Магнитное поле не действует на неподвижные электрические заряды, в отличие от электрического. Следовательно, причиной возникновения индукционного тока в замкнутом проводнике может быть только электрическое поле. На вопрос, как оно в этом случае появляется, в 1864 г. ответил Джеймс Максвелл.

Согласно его теории изменение магнитного поля вызывает появление электрического вихревого поля с замкнутыми силовыми линиями, охватывающими силовые линии магнитного поля.

Вихревое (индукционное) электрическое поле, в отличие от электростатического, не связано с электрическими зарядами. Работа вихревого поля по переносу заряда по замкнутому контуру, в отличие от электростатического, не равна нулю (поле не потенциальное).

При изменении магнитного поля вихревое электрическое поле возникает независимо от наличия или отсутствия проводника. Проводник лишь позволяет обнаружить это поле.

2.3.10. Закон электромагнитной индукции (закон Фарадея)

На основании обобщения многочисленных опытных фактов было установлено, что ЭДС индукции в замкнутом

2.3. Магнитное поле постоянного тока

контуре прямо пропорциональна скорости изменения магнитного потока, проходящего сквозь площадь поверхности, ограниченной контуром проводника: $\mathcal{E} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -\frac{d\Phi}{dt} = -\Phi'$.

Если имеется N витков, то $\mathcal{E} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} N$.

2.3.11. Правило Ленца

Правило Ленца определяет направление индукционного тока.

Возникающий в замкнутом контуре индукционный ток своим магнитным полем противодействует изменению магнитного поля, которое вызывает этот ток.

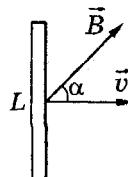
Математически это выражается знаком минус перед скоростью изменения магнитного потока.

Правило Ленца отражает закон сохранения энергии.

2.3.12. ЭДС индукции в движущихся проводниках

Если проводник движется в магнитном поле, то в проводнике также возникает ЭДС индукции. Эта ЭДС обусловлена не вихревым электрическим полем, которое в этом случае не может возникнуть, а другой причиной. Разделение зарядов обусловлено силой Лоренца:

$$\mathcal{E} = \frac{A_{ct}}{q} = \frac{F_{\perp}l}{q} = \frac{Bqv \sin \alpha \cdot l}{q}, \quad \mathcal{E} = Blv \sin \alpha.$$



2.3.13. Самоиндукция

Всякий проводник, по которому проходит электрический ток, всегда находится в магнитном поле, созданном им самим.

Если ток в проводнике изменяется, то изменяется и порожденное им поле. Изменяющееся магнитное поле вызовет в проводнике ЭДС индукции, которая, согласно правилу Ленца, будет препятствовать изменению тока в нем.

2. Электродинамика

Явление возникновения ЭДС индукции в проводнике при изменении силы тока в нем самом называется явлением самоиндукции.

ЭДС индукции, которая в этом случае возникает, получила название ЭДС самоиндукции.

Явление самоиндукции приводит к тому, что после присоединения проводника к источнику тока он устанавливается не сразу, а постепенно. При отключении ток также не может сразу достигнуть нулевого значения.

2.3.14. Индуктивность

Опыты показывают, что магнитный поток, создаваемый проводником с током, при прочих равных условиях пропорционален величине тока в проводнике: $\Phi = LI$.

Коэффициент пропорциональности L называют индуктивностью проводника.

Индуктивность любого проводника зависит от его геометрической формы.

ЭДС самоиндукции можно определить по формуле

$$\mathcal{E}_i = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = L \frac{\Delta I}{\Delta t}.$$

Индуктивность — это физическая величина, численно равная ЭДС самоиндукции, возникающей в контуре при изменении силы тока на 1 А за 1 с. В СИ единицей индуктивности является генри (1 Гн).

Найдем индуктивность соленоида, находящегося в вакууме.

Вектор магнитной индукции внутри соленоида $B = \frac{\mu_0 NI}{l}$.

Магнитный поток через один виток соленоида

$$\Phi = BS = \frac{\mu_0 NIS}{l}.$$

Магнитный поток через N витков $\Phi = \frac{\mu_0 N^2 IS}{l} = LI$.

Тогда $L = \frac{\mu_0 N^2 S}{l} \cdot \frac{l}{l} = \mu_0 n^2 V$, где n — число витков, приходящихся на единицу длины соленоида, V — объем соленоида.

2.3.15. Энергия магнитного поля

Если по катушке идет электрический ток, то он создает магнитное поле, которое обладает вполне определенной энергией. Очевидно, что энергия магнитного поля равна работе, совершающей ЭДС самоиндукции за время убывания силы тока до нуля.

Работа $A = \mathcal{E}_i \Delta q$. Так как $\mathcal{E}_i = -\frac{L \Delta I}{\Delta t}$, где $\Delta I = 0 - I$, то $A = \frac{LI \Delta q}{\Delta t}$. Заряд, который за время Δt пройдет по проводнику, $\Delta q = I_{\text{ср}} \Delta t = \frac{I \Delta t}{2}$. Тогда $A = \frac{LI^2}{2}$. На основании закона сохранения энергии $W = \frac{LI^2}{2}$.

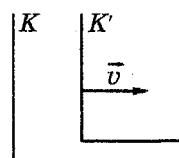
Энергию магнитного поля, заключенную в единице объема пространства, занятого полем, называют объемной плотностью энергии магнитного поля: $w = \frac{W}{V}$.

Так как $L = \mu_0 n^2 V$ и $B = \mu_0 n I$, получаем $I = \frac{B}{\mu_0 n}$. Тогда $W = \frac{\mu_0 n^2 v B^2}{2\mu_0 n^2} = \frac{v B^2}{2\mu_0}$. Следовательно, $w = \frac{B^2}{2\mu_0}$.

2.3.16. Электромагнитное поле

Детальный анализ возникновения электрического и магнитного поля показывает, что по отдельности они могут существовать только в определенной системе отсчета.

Пусть в системе отсчета K электрический заряд поконится. В этой системе наблюдается только электрическое поле. В системе отсчета K' , движущейся по отношению к системе K , будет обнаружено электрическое и магнитное поле.



Пусть в системе K поконится постоянный магнит. В этой системе будет только магнитное поле. В системе отсчета K' магнитное поле будет переменным. Поэтому в этой системе будет обнаружено и вихревое электрическое поле.

2. Электродинамика

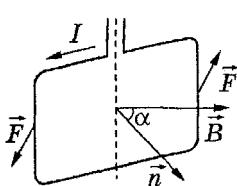
Следовательно, электрическое и магнитное поле — проявление единого целого — электромагнитного поля.

Электромагнитное поле — особая форма материи, осуществляющая взаимодействие между заряженными телами.

В зависимости от того, в какой системе отсчета рассматриваются электромагнитные процессы, проявляются те или иные стороны электромагнитного поля. Нельзя создать переменное магнитное поле, чтобы одновременно в пространстве не существовало электрическое поле и наоборот.

2.3.17. Электрические машины постоянного тока

Силы Ампера, действующие на горизонтальные участки рамки, направлены в противоположные стороны и компенсируют друг друга.



Силы, направленные на вертикальные участки рамки, создают вращающий момент $M = F a \sin \alpha$, где a — длина горизонтальной части рамки. Сила Ампера, действующая на вертикальные участки рамки $F = BIb$, где b — длина вертикальной части рамки.

$M = BIab \sin \alpha = BIS \sin \alpha$. Учитывая, что $P_m = IS$ — магнитный момент, получаем $M = BP_m \sin \alpha$. Момент максимальный, когда рамка расположена вдоль поля, и равен нулю, когда рамка устанавливается поперек поля.

Рассмотренная выше рамка лежит в основе работы электродвигателя постоянного тока.

2.3.18. Тест «Электромагнитная индукция. Энергия магнитного поля»

A1. Виток медного провода помещен в однородное магнитное поле перпендикулярно линиям магнитной индукции. Диаметр витка 20 см, провода — 2 мм. С какой скоростью изменяется индукция магнитного поля, если по кольцу течет ток силой 5А? Удельное сопротивление меди $1,7 \cdot 10^{-8}$ Ом · м.

2.3. Магнитное поле постоянного тока

1) $0,32 \frac{\text{Тл}}{\text{с}}$; 3) $0,54 \frac{\text{Тл}}{\text{с}}$; 5) $0,73 \frac{\text{Тл}}{\text{с}}$.

2) $0,48 \frac{\text{Тл}}{\text{с}}$; 4) $0,67 \frac{\text{Тл}}{\text{с}}$;

A2: С какой скоростью необходимо перемещать проводник, длина активной части которого 1 м, под углом 60° к линиям индукции магнитного поля, чтобы в проводнике возникла ЭДС индукции 1 В? Индукция магнитного поля равна 0,2 Тл.

1) $6,9 \frac{\text{м}}{\text{с}}$; 3) $4,3 \frac{\text{м}}{\text{с}}$; 5) $2,8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

2) $5,8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$; 4) $3,5 \frac{\text{м}}{\text{с}}$;

A3. Найдите индуктивность проводника, в котором равномерное изменение силы тока на 2 А в течение 0,25 с возбуждает ЭДС самоиндукции 20 мВ.

1) 0,5 мГн; 3) 1,5 мГн; 5) 2,5 мГн.

2) 1,0 мГн; 4) 2,0 мГн;

A4. Определите энергию магнитного поля катушки, в которой при силе тока 5 А возникает магнитный поток 0,5 Вб.

1) 0,75 Дж; 3) 1,25 Дж; 5) 1,75 Дж.

2) 1,00 Дж; 4) 1,50 Дж;

A5. Проволочный виток сопротивлением $R = 0,2 \text{ Ом}$ и площадью $S = 50 \text{ см}^2$ с включенным в него конденсатором емкостью $C = 1 \text{ мкФ}$ помещен в однородное магнитное поле, перпендикулярное плоскости витка. Определите заряд q конденсатора, если индукция поля с течением времени убывает равномерно со скоростью $\frac{\Delta B}{\Delta t} = 0,002 \frac{\text{Тл}}{\text{с}}$.

1) 10 пкФ; 3) 6 пкФ; 5) 2 пкФ.

2) 8 пкФ; 4) 4 пкФ;

A6. Определите ЭДС индукции \mathcal{E} , наводимую между концами тонкого металлического стержня длиной l , вращающегося с угловой скоростью ω относительно оси, проходящей через один из его концов перпендикулярно стержню и параллельно магнитному полю с индукцией B .

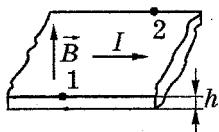
2. Электродинамика

$$1) \mathcal{E} = \omega Bl^2; \quad 3) \mathcal{E} = \frac{\omega Bl}{2}; \quad 5) \mathcal{E} = \omega B^2l^2.$$

$$2) \mathcal{E} = \frac{\omega Bl^2}{2}; \quad 4) \mathcal{E} = \frac{\omega B^2l^2}{2};$$

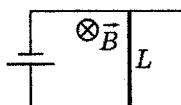
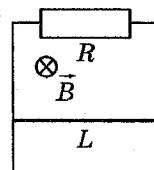
A7. Рамка из провода сопротивлением $R = 0,01$ Ом равномерно вращается в однородном магнитном поле с индукцией $B = 0,05$ Тл. Ось вращения лежит в плоскости рамки и перпендикулярна линиям индукции. Площадь рамки $S = 100$ см². Определите, какое количество электричества протечет через рамку за время поворота ее на угол $\Delta\alpha$ от 30° до 60° . α — угол между направлением индукции и перпендикуляром к плоскости рамки.

- 1) 19,5 мКл; 3) 17,6 мКл; 5) 15,9 мКл.
 2) 18,3 мКл; 4) 16,4 мКл;



B8. По проводящей ленте течет ток I . Лента находится в магнитном поле индукции B . Направление поля перпендикулярно ее плоскости. Найдите разность потенциалов между точками 1 и 2 ленты, если ее толщина равна h , а концентрация электронов в материале ленты — n .

B9. Два металлических толстых стержня расположены вертикально и замкнуты вверху на сопротивление R . По этим стержням без трения и нарушения контакта скользит перемычка длиной L и массой m . Вся система находится в однородном магнитном поле с индукцией B , перпендикулярной плоскости рамки. Найдите установившуюся скорость перемычки.



B10. Проводник длиной L и сопротивлением R лежит на двух горизонтальных шинах, замкнутых на источник тока с ЭДС равной \mathcal{E} . Вся конструкция находится в вертикальном магнитном поле с индукцией B .

С какой скоростью нужно перемещать проводник, чтобы ток через него не протекал? Внутренним сопротивлением источника и сопротивлением шин пренебречь.

3. КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

3.1. Механические колебания

3.1.1. Колебательное движение

Колебание — это движение (изменение состояния), характеризующееся той или иной степенью повторяемости во времени.

Различают механические, электромагнитные, термодинамические колебания и т. д.

Колебания бывают периодическими и непериодическими.

Наиболее простыми в математическом плане из всевозможных периодических колебаний являются гармонические, происходящие по закону синуса или косинуса. Гармонические колебания совершают тело, подвешенное на пружине или на длинной нити, вода в сообщающихся сосудах и т. д.

Гармоническая система обычно имеет одно положение, в котором может пребывать сколь угодно долго, будучи предоставленной самой себе. Это положение равновесия.

Все гармонические колебания в математическом отношении одинаковы.

3.1.2. Амплитуда, частота, период и фаза колебаний

Проекции точки M на координатные оси изменяются согласно уравнениям:

$$X = A \cos(\omega t + \phi_0), \quad Y = A \sin(\omega t + \phi_0).$$

Тогда скорости и ускорения проекций точки M изменяются по законам:

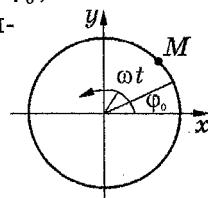
$$v_x = -A\omega \sin(\omega t + \phi_0),$$

$$v_y = A\omega \cos(\omega t + \phi_0),$$

$$a_x = -A\omega^2 \cos(\omega t + \phi_0),$$

$$a_y = -A\omega^2 \sin(\omega t + \phi_0).$$

Из этих уравнений следует, что $v_{\max} = A\omega$, $a_{\max} = -A\omega^2$. В этих уравнениях A — амплитуда колебаний — наибольшее отклонение от положения равновесия.



3. Колебания и волны

Продолжительность одного полного колебания называют периодом колебаний.

Число колебаний в единицу времени называют частотой. Единица измерения частоты — Герц ($1 \text{ Гц} = \text{с}^{-1}$).

Период и частота — обратные величины: $T = \frac{1}{v}$.

Выражение, стоящее под знаком синуса или косинуса, получило название фазы колебания. Фаза колебания характеризует положение колеблющегося тела в данный момент времени. Φ_0 — начальная фаза.

Число колебаний за 2π секунд называют циклической частотой: $\omega = 2\pi v = \frac{2\pi}{T}$.

3.1.3. Свободные колебания

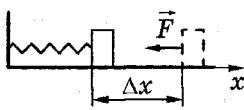
Колебания, которые происходят без внешних воздействий, после того, как тело выведено из положения равновесия, называют свободными.

3.1.4. Собственные колебания

Под собственными колебаниями понимают те колебания, которые может совершить система после выведения ее из положения равновесия. Эти колебания могут происходить со строго определенной частотой, называемой частотой собственных колебаний системы.

3.1.5. Колебание груза на пружине

При смещении груза от положения равновесия на расстояние Δx на груз действует упругая сила $F = -k\Delta x$. По



второму закону Ньютона $F = ma$. Тогда $ma + k\Delta x = 0$, или $a + \frac{k}{m}\Delta x = 0$. Так как $a = x''$, то $x'' + \frac{k}{m}x = 0$.

Последнее выражение является уравнением гармонических колебаний. Так как $a_{\max} = -A\omega^2$, то положив $a = a_{\max}$

3.1. Механические колебания

и $x = A$, получаем $\omega^2 = \frac{k}{m}$. Следовательно, период колебаний $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$.

При колебаниях груза в вертикальной плоскости период определяется по той же формуле.

3.1.6. Математический маятник

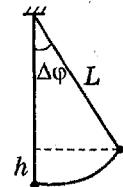
Математическим маятником называют материальную точку, подвешенную на тонкой, нерастяжимой, невесомой нити, совершающей колебания вблизи положения равновесия.

Если отклонить нить маятника на маленький угол $\Delta\phi$ от положения равновесия, то на основании закона сохранения энергии $mgh = mgl(1 - \cos \Delta\phi) = \frac{mv^2}{2}$, откуда $v^2 = 2gl(1 - \cos \Delta\phi)$.

Так как $(1 - \cos \Delta\phi) = 2 \sin^2 \frac{\Delta\phi}{2}$ и $\Delta\phi$ стремится к нулю, то $\sin^2 \frac{\Delta\phi}{2} = \frac{\Delta\phi^2}{4}$. Тогда $v^2 = gl\Delta\phi^2$.

Угловая амплитуда колебаний $\Delta\phi = \frac{A}{l}$, тогда $v^2 = \frac{gA^2}{l}$.

Циклическая частота и период: $\omega = \sqrt{\frac{g}{l}}$, $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$.



3.1.7. Превращение энергии при колебательном движении

При механических колебательных движениях происходит периодическое превращение потенциальной энергии в кинетическую и наоборот. Если нет потерь, то полная энергия сохраняется: $E_{\text{полн}} = E_{K_{\max}} = \frac{mA^2\omega^2}{2}$.

3.1.8. Затухающие колебания. Вынужденные колебания

В любой реальной системе всегда присутствуют силы сопротивления, поэтому полная механическая энергия

3. Колебания и волны

системы с течением времени будет уменьшаться, переходя в тепловую. При этом амплитуда колебаний будет уменьшаться.

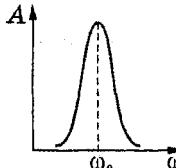
Колебания, амплитуда которых уменьшается с течением времени, называют затухающими.

Вынужденные колебания — это колебания, совершаемые телом под действием периодически изменяющейся силы.

Частота установившихся вынужденных колебаний равна частоте вынуждающей силы.

3.1.9. Резонанс

В том случае, если частота действия внешней силы совпадает с собственной частотой колебаний системы, наблюдается резкое увеличение амплитуды колебаний системы. Это явление получило название резонанса.



Увеличение амплитуды колебаний объясняется тем, что внешняя сила на протяжении периода совершает только положительную работу, так как направление действия внешней силы совпадает с направлением движения колеблющегося тела.

Резонанс может быть как полезным, так и вредным.

3.1.10. Автоколебания

Автоколебания — это незатухающие колебания, поддерживаемые внешним источником энергии, вид и свойство которых определяются самой системой.

При этом должны выполняться два условия:

1) поступление энергии в колебательную систему должно происходить «в такт» со свободными колебаниями, происходящими в ней;

2) количество энергии, поступающей от источника за период, должно быть точно равно тому количеству энергии, которое за это время необратимо превратилось в другие виды энергии.

3.1. Механические колебания

Для выполнения этих условий помимо источника тока необходимо иметь специальное устройство, которое бы регулировало поступление энергии в колебательную систему.

3.1.11. Тест «Механические колебания»

A1. Точка совершает гармонические колебания вдоль некоторой прямой с периодом $T = 6$ с и амплитудой $A = 10$ см. Найдите среднюю скорость точки за время, в течение которого она проходит путь, равный половине амплитуды из крайнего положения.

- 1) $0,05 \frac{\text{м}}{\text{с}}$; 3) $0,3 \frac{\text{м}}{\text{с}}$; 5) $0,5 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.
2) $0,08 \frac{\text{м}}{\text{с}}$; 4) $0,4 \frac{\text{м}}{\text{с}}$;

A2. Координата колеблющегося тела изменяется по закону $x = 5 \cos\left(\frac{\pi t}{2}\right)$. Все величины выражены в единицах СИ. Чему равна частота колебаний?

- 1) 0,1 Гц; 3) 0,3 Гц; 5) 0,5 Гц.
2) 0,2 Гц; 4) 0,4 Гц;

A3. Как изменится период колебаний груза на пружине, если массу груза увеличить в 4 раза, а жесткость пружины уменьшить в 4 раза?

- 1) $T_2 = T_1$; 3) $T_2 = 4T_1$; 5) $T_1 = 4T_2$.
2) $T_2 = 2T_1$; 4) $T_1 = 2T_2$;

A4. Как изменится период колебаний математического маятника, если его длина уменьшится в 9 раз?

- 1) $T_2 = 3T_1$; 3) $T_2 = T_1$; 5) $T_1 = 3T_2$.
2) $T_2 = 2T_1$; 4) $T_1 = 2T_2$;

A5. Маятник длиной 1 м подвешен к потолку вагона, движущемуся горизонтально по прямой. Вагон движется равноускоренно, и на расстоянии 100 м его скорость увеличивается от $18 \frac{\text{км}}{\text{ч}}$ до $72 \frac{\text{км}}{\text{ч}}$. Чему равен период

3. Колебания и волны

колебаний маятника? Ускорение свободного падения принять равным $9,8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$.

- 1) 1 с; 2) 2 с; 3) 3 с; 4) 4 с; 5) 5 с.

A6. Если к вертикально расположенной пружине подвесить шарик, то она растягивается на 4 см. Найдите период колебаний шарика на этой пружине. Массой пружины пренебречь.

- 1) 0,1 с; 2) 0,2 с; 3) 0,3 с; 4) 0,4 с; 5) 0,5 с.

A7. Гиря, подвешенная на пружине, колеблется по вертикали с амплитудой 5 см. Найдите полную энергию колебания гири, если жесткость пружины равна $1 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$.

- 1) 0,75 Дж; 3) 1,25 Дж; 5) 1,75 Дж.
2) 1 Дж; 4) 1,5 Дж;

B8. Концы ножек камертона колеблются с амплитудой 0,5 мм и частотой 100 Гц. Найдите среднюю скорость движения ножек за $\frac{1}{4}$ периода от прохождения ими положения равновесия.

B9. Точка совершает колебания, описываемые уравнением $x = 5\sin(2t)$ (x — в сантиметрах; t — в секундах). В некоторый момент времени сила, действующая на точку, равна 5 мН, а ее потенциальная энергия 0,1 мДж. Чему равна кинетическая энергия точки в этот момент времени?

B10. Два шарика массой 1 кг и 2 кг, скрепленные между собой пружиной, жесткость которой $100 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$, лежат на гладкой горизонтальной плоскости. Пружину сжимают и отпускают. Определите циклическую частоту возникших колебаний.

3.2. Электромагнитные колебания

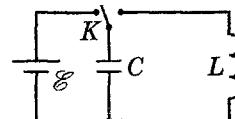
3.2. Электромагнитные колебания

3.2.1. Свободные электромагнитные колебания в контуре

Электромагнитными колебаниями называют колебание силы тока, напряжения, других характеристик электрического тока.

Гармонические электромагнитные колебания осуществляются в колебательном контуре, состоящем из катушки и конденсатора.

Если зарядить конденсатор и замкнуть его на катушку, то через нее пойдет электрический ток. Ток не может сразу достичнуть своего максимального значения, так как при прохождении тока через катушку в ней возникает ЭДС самоиндукции, которая, согласно правилу Ленца, будет препятствовать нарастанию тока. Ток достигнет максимального значения в тот момент, когда конденсатор полностью разрядится.



В следующее мгновение сила тока и связанное с ним магнитное поле начинают убывать. Это приведет к появлению индукционного электрического поля, которое будет поддерживать убывающую силу тока, что приведет к перезарядке конденсатора. После этого процесс повторится. Но ток потечет в обратном направлении.

Таким образом, величина тока, напряжение, заряд на конденсаторе и магнитный поток в катушке будут периодически изменяться, как показывают теория и опыт, по гармоническому закону.

Из-за потерь на сопротивление и излучения электромагнитные колебания в контуре будут затухающими.

3.2.2. Превращение энергии в колебательном контуре

В колебательном контуре происходит периодическое превращение энергии электрического поля конденсатора в энергию магнитного поля катушки и наоборот. Если не

3. Колебания и волны

учитывать потери энергии, то имеет место следующее уравнение: $W = \frac{CU^2}{2} + \frac{LI^2}{2}$. Откуда $\frac{CU_{\max}^2}{2} = \frac{LI_{\max}^2}{2}$.

3.2.3. Собственная частота колебаний в контуре

Полная энергия в контуре $W = \frac{q^2}{2C} + \frac{LI^2}{2}$.

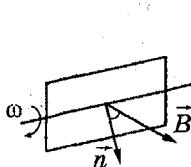
Так как полная энергия постоянна, то $\frac{dW}{dt} = W' = 0$.

Поэтому $0 = \frac{2qq'}{2C} + \frac{2LII'}{2}$. Учитывая, что $I = q'$ и $I' = q''$, получаем $q'' + \frac{1}{LC}q = 0$.

Предположим, что $\omega^2 = \frac{1}{LC}$, тогда $q'' + \omega^2q = 0$ — уравнение гармонических колебаний с частотой $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$. Период колебаний $T = 2\pi\sqrt{LC}$ — формула Томсона.

3.2.4. Переменный ток

Ток, периодический изменяющийся по величине и направлению, называют переменным.



Наибольшее распространение получил переменный ток, колебания в котором происходят по гармоническому закону с частотой 50 Гц. Такой ток можно получить путем вращения рамки из металлической проволоки в однородном магнитном поле.

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d(BS \cos(\omega t))}{dt} = BS\omega \sin(\omega t).$$

Если количество витков в рамке N , то $\mathcal{E} = BSN\omega \sin(\omega t)$.

3.2.5. Активное сопротивление в цепи переменного тока

Активным сопротивлением в цепи переменного тока называют сопротивление, на котором подводимая к нему электрическая энергия полностью и необратимо превращается в тепловую энергию.

3.2. Электромагнитные колебания

Пусть напряжение на активном сопротивлении изменяется по закону $U = U_0 \sin(\omega t)$, тогда

$$I = \frac{U}{R} = \frac{U_0 \sin(\omega t)}{R} = I_0 \sin(\omega t).$$

Из этих уравнений следует, что напряжение и ток в цепи с активным сопротивлением совпадают по фазе.

3.2.6. Действующее значение напряжения и силы переменного тока

Напряжение и сила переменного тока все время изменяются. Возникает вопрос: как их измерять? Измеряют переменный ток его действующим значением.

Действующим значением переменного тока называют величину такого постоянного тока, который, проходя через проводник, выделит в нем такое же количество тепла, как за то же время переменный.

Постоянный ток за время T выделит количество теплоты $Q = I^2 RT$. А переменный — $Q = \langle i \rangle^2 RT$. Тогда $I^2 = \langle i \rangle^2$. Так как $i = I_0 \sin(\omega t)$, то $I^2 = I_0^2 \sin^2(\omega t)$. Учитывая, что $\sin^2(\omega t) = \frac{1 - \cos(2\omega t)}{2}$, получаем $I^2 = \frac{1}{2} I_0^2 (1 - \cos(2\omega t))$.

Так как среднее значение $\cos(2\omega t)$ за период равно нулю, то действующее значение тока $I_g = \frac{I_0}{\sqrt{2}}$, а действующее значение напряжения $U_g = \frac{U_0}{\sqrt{2}}$.

3.2.7. Индуктивность в цепи переменного тока

Опыты показывают, что индуктивность в цепи влияет на силу переменного тока. Объясняется это явлением самоиндукции.

Если напряжение быстро меняется, то сила тока не будет успевать достигать тех значений, которые он бы приобрел с течением времени при постоянном напряжении.

Очевидно, что сила переменного тока будет ограничиваться тем больше, чем больше индуктивность и частота приложенного напряжения.

3. Колебания и волны

Исследуем цепь, содержащую только индуктивность (катушка идеальная). Пусть через индуктивность L течет ток $I = I_0 \sin(\omega t)$. Напряжение на катушке равно ЭДС самоиндукции с обратным знаком:

$$U = L \frac{dI}{dt} = \omega L I_0 \cos(\omega t) = \omega L I_0 \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right).$$

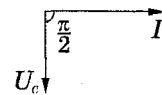
Из сравнения уравнений тока и напряжения

следует, что напряжение опережает ток на $\frac{\pi}{2}$.

Максимальное напряжение $U_0 = \omega L I_0$. Величина $X_L = \omega L$ получила название индуктивное сопротивление.

3.2.8. Емкость в цепи переменного тока

Постоянный ток не может существовать в цепи, содержащей конденсатор, а переменный может. Это объясняется зарядкой и разрядкой конденсатора под действием переменного тока.



Напряжение на конденсаторе $U = \frac{q}{C} = U_0 \sin(\omega t)$, заряд $q = CU_0 \sin(\omega t)$.

Сила тока $I = \frac{dq}{dt} = \omega C U_0 \cos(\omega t) = I_0 \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$.

Напряжение отстает от тока на $\frac{\pi}{2}$.

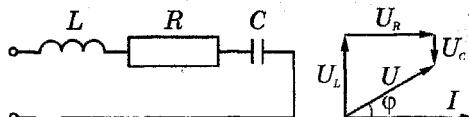
Амплитуда силы тока $I_0 = \omega C U_0$, или $U_0 = \frac{I_0}{\omega C}$.

Величина $X_C = \frac{1}{\omega C}$ получила название емкостное сопротивление.

Емкостное и индуктивное сопротивления называют реактивными сопротивлениями.

3.2.9. Закон Ома для переменного тока

Рассмотрим цепь переменного тока, состоящую из катушки L , активного сопротивления R и конденсатора C , соединенных последовательно.



3.2. Электромагнитные колебания

Пусть ток в цепи $I = I_0 \sin(\omega t)$. Как видно из векторной диаграммы, $IZ = \sqrt{I^2 R^2 + (IX_L - IX_C)^2}$.

Тогда полное сопротивление цепи $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$, $U = \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2}$. Следовательно,

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}} \cdot \cos \varphi = \frac{R}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}}.$$

3.2.10. Резонанс в цепи переменного тока

Из формулы закона Ома для переменного тока следует, что при $X_L = X_C$ реактивное сопротивление равно нулю.

Режим электрической цепи при последовательном соединении участков с индуктивностью и емкостью, характеризующийся равенством индуктивного и емкостного сопротивлений, называют резонансом напряжений.

3.2.11. Мощность в цепи переменного тока

Мощность можно определить по формулам:

$$S = IU = I^2 \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{(I^2 R)^2 + (I^2 X_L - I^2 X_C)^2}.$$

Мощность $P = I^2 R$ называют активной мощностью, единица измерения — Ватт (1 Вт).

Мощность $Q = I^2 (X_L - X_C)$ называют реактивной мощностью, единица измерения — вар (1 Вар).

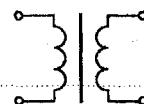
Полная мощность S измеряется в вольт-амперах (1 ВА).

$$P = IU \cos \varphi, \quad Q = IU \sin \varphi, \quad S = \sqrt{P^2 + Q^2}.$$

3.2.12. Трансформатор.

Трансформатор — это устройство, состоящее из замкнутого железного сердечника, на который надеты две или более катушек.

Трансформатор служит для преобразования переменного напряжения. Действие трансформатора основано на явлении электромагнитной индукции.



3. Колебания и волны

Рассмотрим режим холостого хода (вторичная обмотка разомкнута).

При прохождении переменного тока по первичной обмотке в железном сердечнике появляется переменный магнитный поток, который возбуждает ЭДС индукции в каждой обмотке: $\mathcal{E}_1 = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} n_1$, $\mathcal{E}_2 = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} n_2$.

В этих формулах n_1 и n_2 — количество витков в обмотках.

Отношение $\frac{n_1}{n_2} = \frac{\mathcal{E}_1}{\mathcal{E}_2} = k$ называют коэффициентом трансформации.

Напряжение, приложенное к первичной обмотке, $U_1 = E_1 + I_1 R_1$. Обычно сопротивлением первичной обмотки пренебрегают, так как падение напряжения на нем мало по сравнению с ЭДС на первичной обмотке. Поэтому можно считать $U_1 \approx \mathcal{E}_1$, $U_2 \approx \mathcal{E}_2$.

Рабочий режим (вторичная обмотка замкнута на нагрузку): $U_2 = \mathcal{E}_2 - I_2 R_2$. $\frac{\mathcal{E}_1 + I_1 R_1}{\mathcal{E}_2 + I_2 R_2} = \frac{n_1}{n_2} \approx \frac{U_1}{U_2}$.

Если пренебречь потерями в трансформаторе, то мощность, подаваемая на первичную обмотку, равна мощности, снимаемой со вторичной обмотки. $P_1 \approx P_2$, откуда следует, что $\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{I_2}{I_1}$.

КПД трансформатора обычно составляет $\eta = (95 - 99,5) \%$.

Потери энергии в трансформаторе:

- 1) Токи Фуко — нагрев железа сердечника.
- 2) Нагрев обмоток.
- 3) Работа по перемагничиванию сердечника.
- 4) Рассеивание магнитного потока.

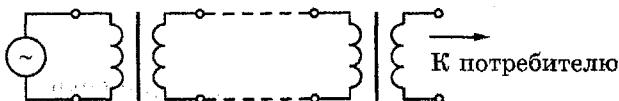
3.2.13. Передача электроэнергии

Основным преимуществом электрической энергии по сравнению с любыми другими видами является то, что ее сравнительно просто можно передавать на большие расстояния. При этом все же есть потери в основном на нагрев проводов: $Q = I^2 R t$.

3.2. Электромагнитные колебания

Из формулы видно, что потери уменьшаются при снижении сопротивления проводов и уменьшении величины тока.

Снижать сопротивление проводов экономически не выгодно, так как это связано с увеличением их сечения, т. е. расхода материала.



Снижать ток при передаче одной и той же мощности можно путем увеличения напряжения.

3.2.14. Тест «Электромагнитные колебания»

A1. Найдите индуктивность катушки, если амплитуда напряжения на ее концах 160 В, амплитуда тока в ней 10 А и частота тока 50 Гц.

- 1) 0,025 Гн; 3) 0,051 Гн; 5) 0,083 Гн.
2) 0,032 Гн; 4) 0,075 Гн;

A2. К зажимам генератора присоединен конденсатор емкостью 0,1 мкФ. Найдите амплитуду напряжения на конденсаторе, если амплитуда тока равна 2,2 А, а период переменного тока равен 0,2 мс.

- 1) 800 В; 3) 600 В; 5) 450 В.
2) 700 В; 4) 500 В;

A3. В цепь переменного тока последовательно включены резистор сопротивлением 1 кОм, катушка с индуктивностью 0,5 Гн и конденсатор с емкостью 1 мкФ. Найдите полное сопротивление цепи при частоте тока 50 Гц. При какой частоте тока сопротивление цепи будет минимальным?

- 1) 3 187 Ом, 225 Гц; 4) 4 278 Ом, 250 Гц;
2) 3 300 Ом, 115 Гц; 5) 5 435 Ом, 300 Гц.
3) 124 Ом, 100 Гц;

A4. От генератора переменного тока питается электропечь с сопротивлением 22 Ом. Найдите количество теплоты, выделяемой печью за 1 ч, если амплитуда тока 10 А.

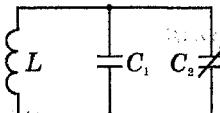
3. Колебания и волны

- 1) 7,92 МДж; 3) 5,46 МДж; 5) 3,96 МДж.
2) 6,35 МДж; 4) 4,27 МДж;

A5. Первичная обмотка понижающего трансформатора с коэффициентом трансформации $k = 10$ включена в сеть переменного тока с напряжением $U_1 = 120$ В. Сопротивление вторичной обмотки $R_2 = 1,2$ Ом, ток в ней $I_2 = 5$ А. Найдите сопротивление R_H нагрузки трансформатора.

- 1) 0,6 Ом; 3) 1,0 Ом; 5) 1,4 Ом.
2) 0,8 Ом; 4) 1,2 Ом;

A6. Найдите период электромагнитных колебаний контура, если индуктивность катушки $L = 10$ мГн, емкость конденсатора $C_1 = 880$ пФ, емкость подстроичного конденсатора $C_2 = 20$ пФ.



- 1) 18,8 мкс; 4) 14,8 мкс;
2) 16,9 мкс; 5) 13,5 мкс.
3) 15,7 мкс;

A7. Неоновая лампа включена в сеть переменного тока с эффективным напряжением $U_0 = 71$ В и периодом колебаний $T = 0,02$ с. Найдите промежуток времени Δt , в течение которого длится вспышка лампы. Напряжение зажигания лампы $U_3 = 86,7$ В считать равным напряжению гашения лампы U_Γ .

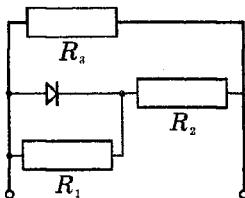
- 1) 2,2 мс; 2) 3,3 мс; 3) 4,6 мс; 4) 8 мс; 5) 12 мс.

B8. Переменный ток возникает в рамке из $n = 200$ витков, с площадью витка $S = 300$ см², в магнитном поле с индукцией $B = 1,5 \cdot 10^{-2}$ Тл. Определите ЭДС индукции через $t = 0,01$ с после начала движения рамки из нейтрального положения. Амплитуда ЭДС $E_0 = 7,2$ В.

B9. Какая мощность выделяется в цепи переменного тока, изображенной на рисунке? Напряжение, приложен-

3.3. Волновое движение

ное к цепи $U = 220$ В, сопротивление резисторов $R_1 = R_2 = R_3 = R = 200$ Ом, диод идеальный.



B10. Найдите амплитуду напряжения в сети, питаемой двумя последовательно включенными генераторами переменного тока, напряжения на зажимах которых меняются по законам $U_1 = 60 \sin(\omega t)$ и $U_2 = 100 \sin(\omega t - 30^\circ)$. Частота тока $v = 50$ Гц.

3.3. Волновое движение

3.3.1. Распространение колебаний. Волны

Если в упругой среде привести в колебательное движение некоторые из ее частей, то эти колебания будут последовательно передаваться из одного места среды к другому. Благодаря наличию инерции колебания последующих участков среды будут запаздывать по сравнению с предыдущими.

Процесс распространения колебаний в упругой среде называют волной.

При распространении волны отсутствует перенос вещества, но происходит передача энергии из одной точки среды к другой.

Основные характеристики волны:

- 1) волновой фронт — поверхность, до которой дошло волновое возмущение в данный момент времени;
- 2) фазовая поверхность — поверхность, точки которой имеют одинаковую фазу;
- 3) луч — линия, проведенная перпендикулярно волновому фронту в направлении распространения волны;
- 4) амплитуда, период, частота;

3. Колебания и волны

5) длина волны — наименьшее расстояние между двумя точками, колебания в которых происходят в одинаковой фазе; $V = \frac{\lambda}{T} = \lambda v$;

6) скорость волны — это скорость перемещения волнового фронта (гребня волны), «это не скорость частиц».

Поперечными волнами называют волны, у которых колебания происходят перпендикулярно направлению распространения волны.

Продольные волны — это волны, у которых колебания происходят в том же направлении, в котором распространяется волна.

3.3.2. Звуковые волны

Звуковыми волнами называют волны, распространяющиеся в твердых, жидких и газообразных веществах, колебания в которых осуществляются в диапазоне от 16 Гц до 20 кГц.

Звуковые волны классифицируются по частоте следующим образом:

- 1) инфразвук ($v < 16$ Гц);
- 2) слышимый звук (16 Гц $< v < 20$ кГц);
- 3) ультразвук ($v > 20$ кГц).

Скорость звуковой волны зависит от упругих свойств, плотности и температуры среды. Наименьшая скорость в газообразных веществах, а наибольшая — в твердых.

3.3.3. Элементы акустики

Одной из важнейших характеристик звуковых сигналов является спектр. Спектром называют набор волн различных частот, образующих данный звуковой сигнал. Спектры бывают сплошными и дискретными.

По типу спектров звуки делятся на шумы и музыкальные тона.

Шум — совокупность множества разнообразных звуков. Он представляет собой сложение большого числа гармони-

3.3. Волновое движение

ческих колебаний с близкими амплитудами, но различными частотами (имеет сплошной спектр).

Музыкальный тон создается периодическими колебаниями специального звучащего тела и представляет собой гармонические колебания одной частоты.

Музыкальный звук — результат наложения нескольких одновременно звучащих музыкальных тонов (дискретный спектр).

Любой звук характеризуется интенсивностью, под которой понимается мощность, переносимая звуковой волной через единичную площадку, расположенную перпендикулярно распространению волны. В СИ интенсивность волны измеряется в ваттах на метр в квадрате $\left(1 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}\right)$. Интенсивность звука, улавливаемая ухом человека, лежит в пределах от $1 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ до $1 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$. При более интенсивных звуках человек испытывает боль.

В акустике используют такую величину, как уровень интенсивности: $L_p = 10 \lg \left(\frac{I}{I_0} \right)$.

$I_0 = 1 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ — звук минимально возможной интенсивности, улавливаемый человеком. Уровень интенсивности измеряется в децибелах (1 Дц).

Громкость звука определяется амплитудой колебаний в звуковой волне. Чем больше амплитуда, тем более громкий звук. Помимо этого громкость звука зависит от частоты колебаний в звуковой волне. При равной амплитуде как более громкие мы воспринимаем звуки, частота которых лежит в пределах от 1 000 Гц до 5 000 Гц.

Высота тона определяется частотой звуковых колебаний.

3.3.4. Эхолокация

Способ ориентации или исследование окружающих объектов, основанный на излучении ультразвуковых импульсов с последующим восприятием эха от них, называется эхолокацией, а соответствующие приборы — эхолокаторами.

3. Колебания и волны

3.3.5. Электромагнитные волны

Если в какой-либо точке пространства возникло быстроменяющееся электрическое поле, то оно в соседних точках пространства возбуждает магнитное поле, которое возбуждает электрическое поле и т. д.

Изменяющиеся электрическое и магнитное поля захватывают все новые и новые области пространства, распространяясь в вакууме, как теоретически доказал Дж. Максвелл, со скоростью $C = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

Процесс распространения периодически изменяющегося электромагнитного поля представляет собой волновой процесс — электромагнитные волны.

Из теории Дж. Максвеля следует, что излучить электромагнитные волны может ускоренно движущийся электрический заряд, в частности колеблющийся.

На практике источником электромагнитных волн может быть любой искровой разряд, открытый колебательный контур. Впервые открыл и исследовал электромагнитные волны Генрих Герц с помощью вибратора.

Теория и опыт показывают, что вектор напряженности электрического поля и вектор индукции магнитного поля перпендикулярны друг другу и скорости распространения волны.

3.3.6. Свойства электромагнитных волн

По частоте (длине волны) различают следующие электромагнитные волны: низкочастотные, радиоволны, инфракрасные, видимый свет, ультрафиолетовые, рентгеновские и гамма-лучи.

Свойства электромагнитных волн в большой степени зависят от частоты. Электромагнитным волнам любой частоты присущи явления: отражение, преломление, интерференция, дифракция, поляризация, дисперсия.

Электромагнитные волны оказывают давление на встречные препятствия, что впервые доказал П. Н. Лебедев.

3.3.7. Энергия электромагнитной волны

Электромагнитные волны, подобно другим волнам, переносят энергию. Энергия электромагнитной волны численно равна сумме энергий ее электрической и магнитной составляющей: $W = W_e + W_m$, или $\omega = \omega_e + \omega_m$ — объемные плотности энергий.

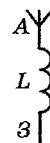
Так как в любой момент времени $\omega_e = \omega_m$, то $\omega = 2\omega_e = \epsilon\epsilon_0 E^2$.

Теория и опыт показывают, что интенсивность электромагнитной волны пропорциональна частоте колебаний в четвертой степени:

$$I \approx v^4.$$

3.3.8. Принцип радиосвязи

Согласно классической электродинамике, излучают электромагнитные волны ускоренно движущиеся электрические заряды. Благоприятные условия для излучения электромагнитных волн создает открытый колебательный контур.



Вследствие того, что энергия излучаемой волны пропорциональна частоте колебаний в четвертой степени, а открытый колебательный контур с разумной высотой антенны может излучать только высокочастотные волны, то для посылки полезного звукового сигнала высокочастотные волны модулируют.

Различают амплитудную и частотную модуляцию. При амплитудной модуляции амплитуду высокочастотных колебаний с помощью специальных устройств (модуляторов) заставляют изменяться в соответствии с полезным звуковым сигналом. Аналогично поступают и при частотной модуляции.

В приемном устройстве из модулированного сигнала выделяется звуковая частота. Этот процесс называют демодуляцией. Процесс демодуляции осуществляется в приемнике.

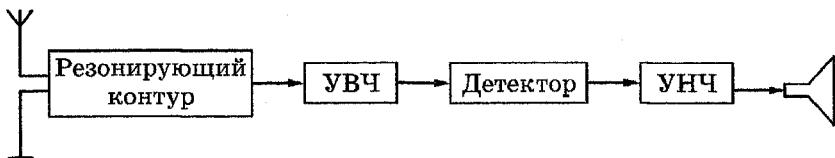
3. Колебания и волны

Блок-схема радиопередатчика:

Микрофон



Блок-схема радиоприемника:



3.3.9. Радиолокация

Обнаружение различных объектов и определение их местоположения при помощи радиоволн называют радиолокацией.

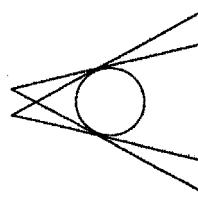
Радиолокатор представляет собой комбинацию УКВ радиопередатчика и приемника. С помощью общей для передачи и приема антенны создается остронаправленный радиолуч. Излучение осуществляется короткими импульсами. Импульсы отражаются от предметов, позволяя после приема и обработки сигнала установить дальность до предмета, скорость и направление его движения.

4. ОПТИКА

4.1. Геометрическая оптика

4.1.1. Прямолинейное распространение света

Опыты показывают, что в однородной среде свет распространяется прямолинейно. Об этом свидетельствуют Солнечные и Лунные затмения, наблюдения за образованием теней и полутеней.



4.1.2. Скорость света

Впервые скорость света была измерена датским астрономом Ремером из наблюдений за затмением спутника Юпитера Ио (1676 г.). Вследствие малой точности своих измерений Ремер получил значение скорости $215\,000 \frac{\text{км}}{\text{с}}$.

Впервые лабораторным методом измерил скорость света Физо (1849 г.). Он получил значение $313\,000 \frac{\text{км}}{\text{с}}$.

Наиболее точно измерил скорость американский учёный Майкельсон. По современным данным скорость света в вакууме равна $299\,792\,456,2(0,8) \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

4.1.3. Принцип Гюйгенса. Принцип Ферма

Голландский физик Христиан Гюйгенс (1690 г.) сформулировал принцип, с помощью которого, зная положение волнового фронта в некоторый момент времени t , можно найти его положение спустя время Δt .

Согласно этому принципу, каждая точка среды, до которой дошло возмущение (волновой фронт), сама становится источником вторичных волн.

Для того чтобы, зная положение волнового фронта в момент времени t , найти его положение в момент времени

4. Оптика

$t + \Delta t$, нужно каждую точку волновой поверхности рассматривать как источник вторичных волн.

Геометрическая огибающая этих вторичных волн и дает положение волнового фронта в следующий момент времени.

Согласно принципу Пьера Ферма, время, необходимое для распространения света от одной точки пространства к другой, должно быть минимальным.

4.1.4. Закон отражения света. Закон преломления света

Луч падающий, луч отраженный и перпендикуляр, опущенный в точку падения к границе раздела сред, лежат в одной плоскости. Угол падения равен углу отражения.

Луч падающий, луч преломленный и перпендикуляр, опущенный в точку падения к границе раздела сред, лежат в одной плоскости. Отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная для данных двух сред и называемая относительным показателем преломления второй среды относительно первой:

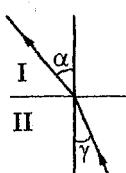
$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{v_1}{v_2} = n_{21}.$$

Эти два закона отражения света можно вывести, основываясь как на принципе Гюйгенса, так и на принципе Ферма.

Показатель преломления среды по отношению к вакууму получил название абсолютный показатель преломления: $n = \frac{C}{v}$. Так как $n_1 = \frac{C}{v_1}$, $n_2 = \frac{C}{v_2}$, то $n_{21} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}$.

В этих соотношениях v — скорость света в среде, C — скорость света в вакууме.

4.1.5. Полное отражение



Если свет падает с оптически более плотной среды в оптически менее плотную среду, то $\gamma < \alpha$. При увеличении угла падения γ увеличивается и угол преломления α . При некотором значении угла падения γ_0 угол преломления $\alpha = 90^\circ$. Это означает, что лучи света, падающие

4.1. Геометрическая оптика

под этим или большим углом, не выйдут из той среды, в которой они распространяются. Такое явление получило название явление полного отражения.

Наименьший угол падения луча, при котором наступает явление полного отражения, называют предельным углом полного отражения $n_{21} = \frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{\sin 90^\circ}{\sin \gamma_0}$, откуда $\sin \gamma_0 = \frac{1}{n}$.

4.1.6. Линзы

Прозрачные для света тела, ограниченные с двух сторон сферическими или иными криволинейными поверхностями, называют линзой.

Линзы, у которых середина толще, чем края, называются выпуклыми, а у которых края толще, чем середина, называются вогнутыми.

Выпуклые линзы собирают посланные на нее параллельные лучи, а вогнутые рассеивают. Поэтому выпуклые линзы называют собирающими, а вогнутые — рассеивающими.

Линза считается тонкой, если ее толщина в центре намного меньше радиусов ее поверхностей.

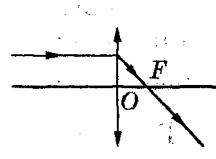
Линза дает неискаженное изображение только для параксиальных лучей, т. е. лучей, идущих вблизи главной оптической оси линзы.

Рассмотрим собирающую линзу.

Точку O , находящуюся в центре линзы, называют оптическим центром линзы. Луч света, проходящий через оптический центр линзы, не преломляется.

Прямая, проходящая через оптический центр линзы перпендикулярно ее плоскости, называется главной оптической осью линзы. Все остальные прямые, проходящие через оптический центр линзы, называются побочными осями линзы.

Луч, посланный на собирающую линзу параллельно главной оптической оси, после прохождения линзы пересечет эту ось в точке F . Расстояние OF называют фокусным расстоянием, а саму точку F — фокусом линзы. У рассеивающей линзы фокус мнимый.



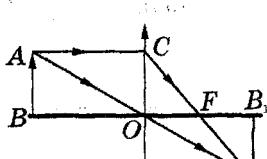
4. Оптика

Величина, обратная фокусному расстоянию, называется оптической силой линзы: $D = \frac{1}{F}$.

Единица измерения оптической силы в СИ — диоптрия (1 дптр).

Оптическая сила системы линз, сложенных вместе, равна алгебраической сумме оптических сил линз, составляющих систему.

4.1.7. Формула линзы



Из подобия ΔAOB и ΔA_1OB_1 имеем:

$$\frac{AB}{A_1B_1} = \frac{BO}{OB_1} \cdot (1)$$

Из подобия ΔOFC и ΔA_1FB_1 с учетом того, что $OC = AB$, получаем:

$$\frac{AB}{A_1B_1} = \frac{OF}{FB_1} \cdot (2)$$

Приравнивая правые части (1) и (2), получаем: $\frac{BO}{OB_1} = \frac{OF}{FB_1}$.

Обозначим расстояние BO от предмета до линзы через d , расстояние OB_1 от линзы до изображения предмета через f , а фокусное расстояние OF через F . Получаем:

$$\frac{d}{f} = \frac{F}{F - f}. \text{ Откуда } d = \frac{1}{\frac{1}{F} - \frac{1}{f}} = \frac{1}{\frac{1}{d}} + \frac{1}{f}.$$

Отношение линейного размера изображения A_1B_1 к линейному размеру предмета AB называют поперечным увеличением линзы: $\Gamma = \frac{A_1B_1}{AB} = \frac{OB_1}{BO} = \frac{f}{d}$.

В формуле линзы величины F , d , f следует считать положительными в случае собирающей линзы, действительных источника и изображения; в случае рассеивающей линзы, мнимых источников и изображений F , d , f считать отрицательными.

4.1.8. Оптические приборы

Лупа представляет собой систему из одной или нескольких линз с небольшим фокусным расстоянием F от 10 до 100 мм. Дает мнимое увеличенное изображение предмета

4.1. Геометрическая оптика

на расстоянии наилучшего зрения $L = 250$ мм для нормального глаза или в бесконечности, т. е. рассматриваемое глазом без усилия аккомодации. Увеличение $\Gamma = \frac{L}{F}$.

Микроскоп представляет собой комбинацию двух оптических систем — объектива и окуляра, разделенных значительным, по сравнению с F_1 и F_2 , расстоянием. Малый объект помещается вблизи переднего фокуса объектива, дающего его увеличенное действительное изображение, которое рассматривается с помощью окуляра, играющего роль лупы. Общее увеличение микроскопа равно произведению увеличений объектива и окуляра: $\Gamma = \frac{\Delta}{F_1} \cdot \frac{L}{F_2}$, где F_1 и F_2 — фокусные расстояния объектива и окуляра, Δ — расстояние между фокусами обеих систем, L — расстояние наилучшего зрения.

Зрительные трубы представляют собой комбинацию двух оптических систем — объектива и окуляра. Действительное уменьшенное изображение удаленного предмета, даваемое объективом, рассматривается через окуляр как в лупу. Увеличение зрительных труб $\Gamma = \frac{F_1}{F_2}$, где F_1 и F_2 — фокусные расстояния объектива и окуляра.

4.1.9. Тест «Геометрическая оптика»

A1. Определите высоту h , на которой висит уличный фонарь, если известно, что в некоторый момент времени длина тени человека, который приближается к фонарю, была равна 0,4 м. Рост человека 1,8 м, а его расстояние до столба, на котором висит фонарь, равно 0,8 м.

- 1) 3,6 м; 3) 5,4 м; 5) 7,3 м.
2) 4,7 м; 4) 6,2 м;

A2. Высота Солнца над горизонтом составляет угол $\phi = 10^\circ$. Пользуясь зеркалом, пускают «зайчик» в водоем. Под каким углом к горизонту нужно расположить зеркало,

4. Оптика

чтобы луч света шел в воде под углом $\gamma = 41^\circ$ к вертикали? Показатель преломления воды $n = 1,32$. Считать, что нормаль к зеркалу лежит в вертикальной плоскости.

- 1) 40° ; 2) 50° ; 3) 60° ; 4) 70° ; 5) 80° .

A3. Пучок параллельных лучей падает из воздуха на поверхность воды под углом $\alpha = 10^\circ$ к нормали. Ширина пучка в воздухе $d = 10$ см, показатель преломления воды $n = \frac{4}{3}$. Определите ширину пучка в воде.

- 1) 6,6 см; 3) 10 см; 5) 15,2 см.
2) 8,6 см; 4) 13,3 см;

A4. В водоем на некоторую глубину помещают источник белого света. Показатель преломления воды для красных лучей 1,328, для фиолетовых — 1,335. Вычислите отношение $\frac{R_k}{R_\phi}$, в пределах которых возможен выход красных и фиолетовых лучей в воздух.

- 1) 1,012; 3) 1,048; 5) 1,084.
2) 1,022; 4) 1,067;

A5. На каком расстоянии от выпуклой линзы с фокусным расстоянием 32 см следует поместить предмет, чтобы получить действительное изображение, увеличенное в 4 раза?

- 1) 20 см; 3) 60 см; 5) 100 см.
2) 40 см; 4) 80 см;

A6. Мнимое изображение светящейся точки в рассеивающей линзе с оптической силой $D = -5$ дптр находится в два раза ближе к линзе, чем сама точка. Найдите расстояние от линзы до светящейся точки, если она лежит на главной оптической оси линзы.

- 1) 0,1 м; 2) 0,2 м; 3) 0,3 м; 4) 0,4 м; 5) 0,5 м.

A7. Грузик на пружине совершает вертикальные гармонические колебания. С помощью собирающей линзы получено четкое изображение грузика на пружине, находящемся на расстоянии 0,5 м от линзы. Амплитуда колебаний

4.1. Геометрическая оптика

изображения $0,1$ м, максимальная скорость изображения $1 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Определите период колебаний T и максимальную скорость V_{\max} движения самого грузика. Оптическая сила линзы $D = 5$ дптр.

- 1) $0,63$ с, $0,67 \frac{\text{м}}{\text{с}}$; 4) $0,63$ с, $1 \frac{\text{м}}{\text{с}}$;
2) $0,56$ с, $0,34 \frac{\text{м}}{\text{с}}$; 5) $0,63$ с, $0,95 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.
3) $0,63$ с, $1,24 \frac{\text{м}}{\text{с}}$;

B8. На собирающую линзу с фокусным расстоянием $F_1 = 40$ см падает пучок параллельных лучей света радиусом $R = 2$ см. За этой линзой расположена рассеивающая линза с фокусным расстоянием $F_2 = -15$ см, причем главные оптические оси линз и ось пучка совпадают. Чему равен радиус r пучка, выпедшего из второй линзы, если известно, что лучи в нем параллельны?

B9. С помощью фотоаппарата, дающего изображение 9×12 см², требуется снять здание длиной $L = 50$ м. На каком расстоянии от здания нужно установить аппарат, чтобы весь фасад здания уместился на пластине аппарата, если главное фокусное расстояние объектива $F = 12$ см?

B10. Точечный источник света находится на главной оптической оси собирающей линзы, фокусное расстояние которой F_0 . Пучок преломленных лучей в фокальной плоскости линзы имеет диаметр в n ($n > 1$) раз больше, чем диаметр отверстия круговой диафрагмы, расположенной вплотную к линзе. На каком расстоянии d от линзы расположен источник света?

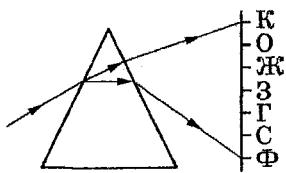
4.2. Волновая оптика

4.2.1. Дисперсия света

Под дисперсией света понимают явление зависимости показателя преломления вещества от частоты (длины) волны света.

4. Оптика

В результате дисперсии белый свет, проходя через призму, разлагается на составляющие его цвета, образуя на экране спектр. Впервые это явление описал Ньютон.



Так как $v = \frac{C}{n}$, то скорость у красного света в веществе наибольшая, а у фиолетового — наименьшая.

4.2.2. Спектральный анализ

Любое нагретое тело начинает светиться. От светящихся тел получают сплошные (непрерывные), полосатые и линейчатые спектры.

Сплошные спектры дают разогретые тела в твердом или жидком состоянии.

Полосатые спектры имеют газы, состоящие из слабо связанных друг с другом молекул. Эти спектры состоят из ряда светлых полос, разделенных темными промежутками.

Линейчатый спектр представляет собой набор цветных линий различной яркости, разделенных широкими темными полосами. Этот спектр дают все элементы, находящиеся в атомарном состоянии. Каждый элемент отличается от других своим спектром.

Если пропускать белый свет сквозь холодный, неизлучающий газ, то на фоне непрерывного спектра-источника появляются темные линии. Такой спектр получил название спектра поглощения.

Опыты показывают, что эти темные линии появляются в тех местах, где были бы цветные линии в спектре излучения данного газа.

Исследуя спектры излучения и поглощения, Кирхгоф пришел к выводу, что вещества способны поглощать только тот свет, который они могут излучать в нагретом состоянии.

Спектральный анализ — это физический метод качественного и количественного анализа химического вещества, основанный на изучении его оптического спектра.

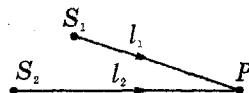
4.2. Волновая оптика

Помимо этого, с помощью спектрального анализа можно определять температуру тел, относительные скорости звезд.

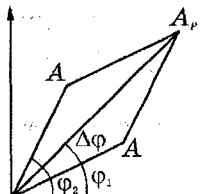
Приборы для визуального наблюдения спектров называют спектроскопами, а с фотографической регистрацией спектров — спектрографами.

4.2.3. Интерференция

Пусть имеется два источника монохроматических волн одинаковой частоты и амплитуды.



Найдем амплитуду результирующей волны в точке Р.



$$A_p = \sqrt{A^2 + A^2 + 2AA \cos(\Delta\phi)} = \\ = A\sqrt{2(1 + \cos(\Delta\phi))}.$$

1) Пусть в точку Р волна придет с разностью фаз $\Delta\phi = 0; 2\pi; 4\pi; \dots 2k\pi$. Тогда $A_p = 2A$. Будет наблюдаться усиление колебаний. Этот случай может реализоваться, если в разность хода $\Delta = l_2 - l_1$ вкладывается целое число длин волн λ или четное число длин полуволн $\frac{\lambda}{2}$.

Таким образом, условием максимума колебаний в точке Р является то, что $\Delta = 2k\frac{\lambda}{2} = k\lambda$, где $k = 0; 1; 2; 3; \dots$

2) Пусть в точку Р волны приходят с разностью фаз $\Delta\phi = \pi; 3\pi; (2k + 15\pi)\dots\pi$, где $k = 0; 1; 2; 3\dots$ Тогда $A_p = 0$. Этот случай может быть реализован, если $\Delta = (2k + 1)\frac{\lambda}{2}$, т. е. в разность хода вкладывается нечетное число полуволн.

Явление усиления или ослабления амплитуды результирующего колебания при наложении волн называется интерференцией.

Для получения устойчивой интерференционной картины необходимо, чтобы волны были когерентными.

4. Оптика

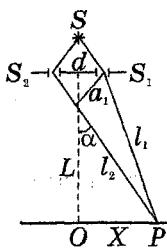
Когерентными называют две волны, у которых одинаковые частоты, а разность фаз их колебаний постоянна.

При интерференции энергия волны перераспределяется: она максимальна в максимумах и равна нулю в минимумах.

При распространении световых волн в среде с различными показателями преломления разность хода $\Delta = n_2 l_2 - n_1 l_1$.

4.2.4. Интерференция света

Получить устойчивую интерференционную картину от двух источников света нельзя, так как световые волны в них не когерентны. Но если каким-то образом свет от одного источника разделить на два пучка, а затем наложить друг на друга, то можно получить устойчивую интерференционную картину.



На рисунке представлена схема опыта Юнга. В этом опыте источником света служат две узкие щели S_1 и S_2 , расположенные на расстоянии $d = 1$ мм друг от друга. На расстоянии $L = 3$ м от щелей расположен экран. Длина волны света, излучаемого источником S , $\lambda = 600$ нм. Определим на экране положение трех первых светлых полос.

Так как на щели падает свет от одного и того же источника S , то щели являются когерентными источниками света, и на экране возникает устойчивая интерференционная картина. Результат интерференции света в произвольной точке P определяется разностью хода лучей $\Delta = l_2 - l_1$. Для центральной точки экрана (точка O) разность хода лучей равна нулю, и там будет наблюдаться светлая полоса, которая считается интерференционной полосой нулевого порядка.

При удалении от точки O вправо или влево возникает разность хода лучей, в результате чего светлая полоса смещается темной, затем снова возникает светлая полоса и т. д.

Допустим, что в точке P наблюдается k -й интерференционный максимум. Найдем разность хода лучей для этой точки. Так как $d \ll L$ и $X < L$, то

$$\Delta = l_2 - l_1 \approx d \sin \alpha \approx dtg \alpha \approx \frac{dX}{L}.$$

Здесь учтено, что угол α стремится к нулю. Поэтому $\Delta = \frac{dX}{L} = k\lambda$, откуда $X = \frac{k\lambda L}{d}$ — формула Юнга.

Положение первого максимума ($k = 1$) $X_1 = \frac{k\lambda L}{d} = 1,8$ мм, второго — $X_2 = 3,6$ мм, третьего — $X_3 = 5,4$ мм.

Интерференционную картину можно получить с помощью бипризмы Френеля, зеркал Френеля, в тонких пленках, на клине.

Интерференцию применяют:

- 1) для проверки качества обработки поверхностей;
- 2) для измерения малых углов;
- 3) для измерения толщины пленок;
- 4) для просветления оптических стекол;
- 5) для определения показателя преломления прозрачных сред;
- 6) для измерения длины световой волны.

4.2.5. Принцип Гюйгенса — Френеля

Согласно принципу Гюйгенса, каждую точку волнового фронта можно рассматривать как самостоятельный источник колебаний. Огюстен Жан Френель дополнил этот принцип, введя представление о том, что вторичные волны ко-герентны, и поэтому они интерферируют, в результате чего получается волновой фронт в следующий момент времени.

Согласно принципу Гюйгенса — Френеля, волновой фронт в любой точке пространства — это результат интерференции вторичных волн от фиктивных источников.

4.2.6. Дифракция. Дифракционная решетка

Дифракция волн — это явление огибания волнами встречных препятствий.

4. Оптика

Дифракция возможна только в случае соизмеримости длины волны с размерами препятствия.

Дифракцию световых волн можно наблюдать на проволоке, щели, диафрагме. Впервые дифракцию света описал итальянский ученый Гриимальди. Наблюдал это явление и Ньютона, но не смог его правильно объяснить. Наиболее исчерпывающее объяснение дали Юнг и Френель.

Дифракционная решетка представляет собой совокупность большого числа очень узких щелей, разделенных непрозрачными промежутками.

Если ширина прозрачных щелей a , а ширина непрозрачных промежутков b , то величина $d = a + b$ называется периодом решетки. Формула дифракционной решетки

$$d \sin \alpha = k\lambda.$$

4.2.7. Поляризация света

Поляризационной называется волна, в которой существует предпочтительное направление колебаний. Поляризация возникает только у поперечных волн.

Свет называется поляризованным, если в нем происходят колебания только в одном направлении, перпендикулярном направлению распространения волны.

Поляризацию можно наблюдать с помощью двух поляроидов. Первый поляроид пропускает из всего естественного света только компоненту с определенным направлением колебаний. В зависимости от ориентации второго поляроида свет либо проходит, либо не проходит через него.

4.2.8. Тест «Волновая оптика»

A1. Два когерентных источника света, расстояние между которыми $d = 1$ мм, лежат в плоскости, параллельной экрану. Длина волны излучения $\lambda = 500$ нм. Расстояние между источниками света и экраном $L = 4$ м. Найдите расстояние между центральным и вторым максимумом.

- 1) 2 мм; 2) 4 мм; 3) 6 мм; 4) 8 мм; 5) 10 мм.

4.2. Волновая оптика

A2. В спектре излучения газоразрядной лампы, используемой для наблюдения интерференционной картины, имеются две линии: красная ($\lambda_{\text{к}} = 733 \text{ нм}$) и желтая ($\lambda_{\text{ж}}$). При помощи дифракционной решетки на экране получена картина, где дифракционный максимум третьего порядка красной линии накладывается на максимум четвертого порядка желтой линии. Найдите длину волны желтой линии.

- 1) 545 нм; 3) 555 нм; 5) 565 нм.
2) 550 нм; 4) 560 нм;

A3. Спектр получен с помощью дифракционной решетки с периодом $d = 1,9 \cdot 10^{-5} \text{ м}$, расположенной параллельно экрану. Дифракционный максимум второго порядка удален от центрального максимума на расстояние $x = 7,2 \text{ см}$, а от решетки — на расстояние $l = 1 \text{ м}$. Найдите длину волны падающего света.

- 1) 620 нм; 3) 667 нм; 5) 690 нм.
2) 644 нм; 4) 684 нм;

A4. Найдите наибольший порядок спектра для желтой линии ($\lambda_{\text{ж}} = 589 \text{ нм}$), если постоянная дифракционной решетки $d = 2 \text{ мкм}$.

- 1) 2; 2) 3; 3) 4; 4) 5; 5) 6.

A5. Разность хода двух интерферирующих лучей равна $\frac{\lambda}{4}$. Найдите разность фаз колебаний в градусах.

- 1) 30° ; 2) 45° ; 3) 69° ; 4) 75° ; 5) 90° .

A6. Длина волны фиолетовых лучей света в воздухе $\lambda_1 = 400 \text{ нм}$. Какова длина волны λ_2 этих лучей в воде? Абсолютный показатель преломления для воздуха $n_1 = 1$, для воды $n_2 = 1,33$.

- 1) 410 нм; 3) 350 нм; 5) 300 нм.
2) 380 нм; 4) 325 нм;

A7. На стеклянный клин с углом $\phi = 2^\circ$ нормально к его грани падает луч белого света. На какой угол β вследствие дисперсии разойдутся после выхода из клина красный

4. Оптика

и фиолетовый лучи, если показатель преломления стекла для красных лучей $n_{\text{к}} = 1,74$, а для фиолетовых $n_{\phi} = 1,80$?

- 1) 2'; 2) 4'; 3) 7'; 4) 9'; 5) 16'.

B8. На мыльную пленку с показателем преломления $n = 1,33$ падает пучок белого света под углом $\alpha = 45^\circ$. При какой наименьшей толщине пленки отраженные лучи будут окрашены в желтый свет ($\lambda_{\text{ж}} = 600 \text{ нм}$)?

B9. На тонкий стеклянный клин нормально падает пучок монохроматического света с длиной волны $\lambda = 0,6 \text{ мкм}$. Найдите угол клина, если расстояние между интерференционными полосами составляет 4 мм. Показатель преломления стекла $n = 1,5$. Ответ выразите в радианах.

B10. Между стеклянной пластинкой и лежащей на ней плоско-выпуклой линзой налита жидкость. Радиус восьмого темного кольца Ньютона при наблюдении в отраженном свете с длиной волны $\lambda = 700 \text{ нм}$ составляет $r_8 = 2 \text{ мм}$. Радиус кривизны выпуклой поверхности линзы $R = 1 \text{ м}$. Чему равен показатель преломления жидкости?

4.3. Элементы теории относительности

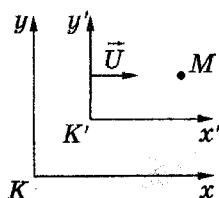
4.3.1. Принцип относительности в классической механике

При описании механического движения всегда пользуются какой-либо системой отсчета.

Систему отсчета, в которой выполняется первый закон Ньютона, называют инерциальной.

Еще Галилей ввел в классическую механику принцип относительности, смысл которого следующий: никакими механическими опытами нельзя установить, покоятся инерциальная система отсчета или движется равномерно и прямолинейно.

Иначе говоря, законы механики имеют один и тот же вид во всех инерциальных



4.3. Элементы теории относительности

системах. Поэтому ни одна из них не имеет преимущества перед другой, т. е. любая из них может быть принята за неподвижную систему.

Принципу относительности Галилея соответствуют преобразования Галилея: $x = x' + Ut$, $V = V' + U$.

Так как $U = \text{const}$, то $a = a'$, $t = t'$ и $F = F'$.

4.3.2. Опыт Майкельсона

Согласно теории Дж. Максвелла, скорость электромагнитной волны в вакууме $C = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

При переходе от одной системы отсчета к другой скорость света должна менять свое значение.

В уравнение Максвелла скорость света входит как константа, поэтому при переходе от одной системы отсчета к другой уравнения Максвелла не должны сохранять свою форму, так как скорость света должна быть другой.

Таким образом, обнаружились определенные противоречия между электродинамикой и классической механикой. Возникшие трудности пытались преодолеть тремя различными способами.

Первая возможность состояла в том, чтобы объявить принцип относительности Галилея не состоятельным в применении к электромагнитным явлениям. Это точка зрения известного голландского физика Х. Лоренца.

Вторая возможность состоит в том, чтобы считать неправильными уравнения Максвелла и пытаться изменить их таким образом, чтобы они при переходе от одной системы отсчета к другой, в соответствии с обычными представлениями о пространстве и времени, не менялись. Такая попытка была предпринята Г. Герцем.

Третья возможность разрешения указанных трудностей состоит в отказе от классических представлений о пространстве и времени с тем, чтобы сохранить как принцип относительности, так и уравнения Максвелла. С данной точки зрения неточными оказываются законы Ньютона, которые и нужно изменить.

4. Оптика

Согласно Лоренцу, должна существовать избранная система отсчета, связанная с мировым эфиром, пребывающим в абсолютном покое. При движении тела по отношению к эфиру должен быть «эфирный ветер». В 1881 г. американские ученые А. Майкельсон и Э. Марли провели опыт по обнаружению «эфирного ветра».

В этом опыте сравнивалась скорость света в направлении движения Земли и в перпендикулярном направлении. Измерения проводились с помощью интерферометра Майкельсона. Эксперименты ставились в разное время года и суток, но всегда получали отрицательный результат. Таким образом, из опытов Майкельсона вытекало, что скорость света не зависит от системы отсчета.

4.3.3. Специальная теория относительности

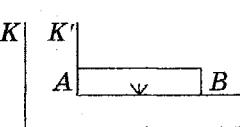
Возникшие противоречия между электродинамикой Максвелла и принципом относительности Галилея были разрешены созданием специальной теории относительности (СТО). СТО была создана в начале XX в. учеными Х. Лоренцом и французским математиком и астрономом А. Пуанкаре. Большой вклад в популяризацию этой теории внес А. Эйнштейн.

В основе этой теории лежат два постулата Пуанкаре:

- 1) все физические явления при одних и тех же условиях во всех инерциальных системах протекают одинаково;
- 2) во всех инерциальных системах отсчета скорость света в вакууме одинакова и не зависит от скорости движения как источника, так и приемника света. Эта скорость является предельной скоростью всех процессов и движений, сопровождаемых переносом энергии.

4.3.4. Преобразования Лоренца

В основе теории относительности лежат преобразования Лоренца

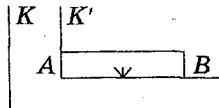

$$x = \frac{x' + Ut'}{\sqrt{1 - \frac{U^2}{c^2}}}, \quad t = \frac{t' + \frac{U}{c^2}x'}{\sqrt{1 - \frac{U^2}{c^2}}}.$$

4.3. Элементы теории относительности

При $U \ll C$ преобразования Лоренца переходят в преобразование Галилея.

4.3.5. Следствие из преобразований Лоренца

1) Относительность одновременности.



События одновременные в системе K' будут неодновременными в системе K .

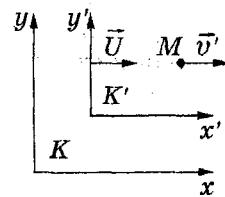
2) Относительность расстояний. $l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$, где l_0 — длина тела в системе отсчета K' , в которой оно поконится, l — длина тела в системе отсчета K , в которой тело движется со скоростью v в направлении длины тела.

3) Относительность времени. $\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$, где τ_0 — время в системе отсчета K' , τ — время в системе отсчета K .

4.3.6. Сложение скоростей

Релятивистский закон сложения скоростей имеет вид: $v = \frac{v' + U}{1 + \frac{v'U}{c^2}}$.

При $v' = c$ получаем $v = c$.



4.3.7. Зависимость массы от скорости

Из теории относительности следует, что масса тела, движущегося со скоростью v относительно неподвижной системы отсчета, зависит от скорости согласно формуле

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

4. Оптика

Впервые задолго до создания теории относительности эту формулу получил Джозеф Томсон в 1881 г. из уравнений Максвелла. Зависимость скорости от массы была доказана экспериментально в 1901 г. Кауфманом.

4.3.8. Связь между массой и энергией. Кинетическая энергия в релятивистской динамике

В классической физике энергия и масса являются двумя различными физическими величинами. В теории относительности энергия связана с массой следующим законом:

$$E = mc^2.$$

В соответствии с этой формулой изменение полной энергии тела или системы тел сопровождается изменением массы тела $\Delta E = \Delta mc^2$.

Масса тела, которая в классической механике выступает как мера инерционных и гравитационных свойств тел, в релятивистской механике имеет смысл энергосодержание тела.

Существует принципиальная возможность перехода вещественных объектов, имеющих массу покоя, в электромагнитное излучение, не имеющее массы покоя, при этом выполняются законы сохранения.

Следует отметить, что формулу $E = mc^2$ впервые получил Томсон в 1881 г.

В релятивистской динамике кинетическая энергия равна разности энергий движущегося и покоящегося тела: $E_k = E - E_0 = mc^2 - m_0c^2$.

КОДЫ ОТВЕТОВ К ТЕСТАМ

Равномерное движение

A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	B8	B9	B10
2	1	4	2	4	1	4	$10 \frac{\text{м}}{\text{с}}$	$67,2 \frac{\text{км}}{\text{ч}}$	$52 \frac{\text{км}}{\text{ч}}$

Равноускоренное движение

A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	B8	B9	B10
2	2	5	4	2	3	3	5 с	$v_0 = \frac{g\tau}{2}$ $v_1 = 6 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ $v_2 = -4 \frac{\text{м}}{\text{с}}$	$t = 10 \text{ с}$

Криволинейное движение. Движение по окружности

A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	B8	B9	B10
4	5	1	2	4	5	4	$a_n = 8,3 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$; $a_t = 5,5 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$	$77,2^\circ$	$7 \frac{\text{м}}{\text{с}}$; $8,5 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$

Динамика прямолинейного движения

A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	B8	B9	B10
5	2	3	4	3	2	4	$7,2 \text{ Н}$	25 Н	$10,2 \text{ Н}$

Динамика вращательного движения. Закон всемирного тяготения

A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	B8	B9	B10
2	3	1	5	2	4	5	$3331 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$0,25 \text{ Н}$	$33,8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$

Закон сохранения импульса

A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	B8	B9	B10
1	4	3	5	2	4	1	2 м	1 см	$0,083 \frac{\text{м}}{\text{с}}$

Работа. Мощность. Механическая энергия

A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	B8	B9	B10
2	3	5	1	3	5	1	76°	4,1 $\frac{\text{м}}{\text{с}}$	$E_K = (F - mg)H$

Законы сохранения импульса и энергии

A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	B8	B9	B10
4	5	4	4	2	3	2	$\Delta L = \frac{mV}{\sqrt{h(m+M)}}$	0,04 $\frac{\text{м}}{\text{с}}$	$V = V_0 \sqrt{\frac{M-m}{M}}$

Элементы статики

A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	B8	B9	B10
3	4	1	3	2	2	1	$R_A = 3\ 750 \text{ Н}$ $R_B = 2\ 250 \text{ Н}$	$T = 250 \text{ Н}$ $R_A = 391 \text{ Н}$	$\varphi = 79,1^\circ$ $T = 2,64 \text{ Н}$

Итоговый тест по механике

A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	B8	B9	B10
2	2	3	5	2	3	2	$\operatorname{tg} \alpha = \mu$	$3,4 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \leq a \leq 8,8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$	25 Дж

Закон Кулона. Напряженность электростатического поля

A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	B8	B9	B10
5	3	4	1	2	5	1	$E = 0,184 k \frac{q}{r^2}$	$0,56 \frac{\text{МВ}}{\text{м}}$ $+ 2 \cdot 10^6 \text{ В}^2$	$X = 1,73 Y +$

Потенциал. Разность потенциалов. Электроемкость

A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	B8	B9	B10
3	1	2	4	1	4	3	$0,2 \frac{\text{м}}{\text{с}}$	1,5	$8,6 \cdot 10^{-10} \text{ Кл}$

Законы постоянного тока

A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	B8	B9	B10
2	4	1	2	1	5	4	$0,4 \text{ А}; 1,2 \text{ А};$ $1,6 \text{ А}$	$21,5 \text{ мКл}$	$I = \frac{4\pi \cdot r \varphi}{\rho}$

Работа и мощность постоянного тока

A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	B8	B9	B10
5	4	1	2	3	1	4	$r = \sqrt{R_1 R_2}$	$P_2 = \frac{(P_1 - P_{01})P_{01}}{P_1}$	$r = R$

Магнитное поле. Силы Ампера и Лоренца

A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	B8	B9	B10
3	3	5	2	1	3	5	$3,5 \cdot 10^5 \text{ В}$	$R = 2,4 \text{ мм};$ $h = 2,6 \text{ см}$	$T = \frac{2\pi \cdot m}{q}$

Электромагнитная индукция. Энергия магнитного поля

A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	B8	B9	B10
3	2	5	3	1	2	2	$U = \frac{BI}{neh}$	$V = \frac{mgR}{B^2 L^2}$	$V = \frac{E}{BL}$

Механические колебания

A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	B8	B9	B10
1	4	3	5	2	4	3	$0,2 \frac{\text{м}}{\text{с}}$	25 мкДж	$12,2 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$

Электромагнитные колебания. Переменный ток

A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	B8	B9	B10
3	2	1	5	4	1	2	5,16 В	423,5 Вт	155 В

Геометрическая оптика

A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	B8	B9	B10
3	5	5	1	2	2	1	0,75 см	50 см	$D = \frac{F}{n}$

Волновая оптика

A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	B8	B9	B10
2	2	4	2	5	5	3	$1,33 \cdot 10^{-7} \text{ м}$	$1,33 \cdot 10^{-7} \text{ м}$	$5 \cdot 10^{-5} \text{ рад}$

ПРИЛОЖЕНИЕ

Основные физические константы

Величина	Обозначение	Значение	Изменение
Гравитационная постоянная	G	$6,672 \cdot 10^{-11}$	$\frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2}$
Ускорение свободного падения	g	9,8065	$\frac{\text{м}}{\text{с}^2}$
Атмосферное давление	P_0	101 325	Па
Постоянная Авогадро	N_A	$6,022045 \cdot 10^{23}$	молъ ⁻¹
Постоянная Больцмана	k	$1,380662 \cdot 10^{-23}$	$\frac{\text{Дж}}{\text{К}}$
Молярная газовая постоянная	R	8,31441	$\frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$
Скорость света в вакууме	C	$2,99792458 \cdot 10^8$	$\frac{\text{м}}{\text{с}}$
Магнитная постоянная	μ_0	$4\pi \cdot 10^{-10} = 1,25663706 \cdot 10^{-6}$	$\frac{\text{Гн}}{\text{м}}$
Электрическая постоянная	ϵ	$8,8541878 \cdot 10^{-12}$	$\frac{\text{Ф}}{\text{м}}$
Масса покоя электрона	m_e	$9,109534 \cdot 10^{-31}$	кг
Масса покоя протона	m_p	$1,6726485 \cdot 10^{-29}$	кг
Элементарный заряд	e	$1,6021892 \cdot 10^{-19}$	Кл
Постоянная Фарадея	F	$9,648456 \cdot 10^9$	$\frac{\text{Кл}}{\text{моль}}$
Постоянная Планка	h	$6,626176 \cdot 10^{-34}$	$\frac{\text{Дж} \cdot \text{с}}{}$
Радиус 1 боровской орбиты	a_0	$0,52917706 \cdot 10^{-11}$	м
Энергия покоя электрона	m_0C^2	0,511034	МэВ
Постоянная Ридберга	R	$1,097 \cdot 10^7$	$\frac{1}{\text{м}}^1$
Атомная единица массы	а.е.м.	1,6606600,6606600	кг

**Приставки для образования десятичных
кратных и дольных единиц**

Множи- тель	Приставка	Обозна- чение	Множи- тель	Приставка	Обозна- чение
10^{21}	зета	З	10^{-1}	дэци	д
10^{18}	экса	Э	10^{-2}	санти	с
10^{15}	пета	П	10^{-3}	милли	м
10^{12}	тера	Т	10^{-6}	микро	мк
10^9	гига	Г	10^{-9}	нано	н
10^6	мега	М	10^{-12}	пико	п
10^3	кило	к	10^{-15}	фемто	ф
10^2	гекто	г	10^{-18}	атто	а
10^1	дека	да	10^{-21}	зетро	з

Астрономические величины

Космическое тело	Средний радиус, м	Масса, кг	Средняя плотность, $10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	Период вращения вокруг оси, сут
Солнце	$6,95 \cdot 10^8$	$1,99 \cdot 10^{30}$	1,41	25,4
Земля	$6,37 \cdot 10^6$	$5,98 \cdot 10^{26}$	5,52	1,0
Луна	$1,74 \cdot 10^6$	$7,35 \cdot 10^{22}$	3,30	27,3

Основные формулы кинематики

Перемещение при равномерном движении $\vec{s} = \vec{v} \cdot \Delta t$, где \vec{v} — скорость, Δt — время.

Средняя скорость $\langle \vec{v} \rangle = \frac{\vec{s}}{\Delta t}$.

Перемещение при равноускоренном движении

$$\vec{s} = \vec{v}_0 \cdot t + \frac{\vec{a} \cdot t^2}{2}, \text{ где } \vec{a} \text{ — ускорение.}$$

В координатной форме $X = \pm X_0 \pm v_0 \cdot t \pm \frac{a \cdot t^2}{2}$. Ставится знак «+», если a или v_0 совпадают по направлению с осью X .

Скорость при равноускоренном движении $\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{a} \cdot t$, где \vec{v}_0 — начальная скорость.

В координатной форме $v = \pm v_0 \pm a \cdot t$.

Угловая скорость при вращательном движении $\omega = \frac{\Delta\phi}{\Delta t} \left(\frac{\text{рад}}{\text{с}} \right)$.
Угловое ускорение $\varepsilon = \frac{\Delta\omega}{\Delta t} \left(\frac{\text{рад}}{\text{с}^2} \right)$.

Нормальное (центростремительное) ускорение $a = \frac{v^2}{R} = \omega^2 R$,
где R — радиус кривизны.

Связь между линейной и угловой скоростями: $v = \omega \cdot R$.

Основные формулы динамики

Второй закон Ньютона $\vec{F} = m\vec{a}$. ($\vec{F}t = m\Delta\vec{v}$).

Сила тяжести $\vec{P} = m\vec{g}$.

Закон всемирного тяготения: $F = G \frac{m_1 m_2}{R^2}$, где G — гравитационная постоянная.

Ускорение свободного падения $g = G \frac{M}{R^2}$, где M — масса Земли, R — радиус Земли.

Закон Гука: $F_{\text{упр}} = -k\Delta L$, где $k = \frac{ES}{L_0}$ — коэффициент упругости, E — модуль Юнга, S — площадь сечения образца, L_0 — первоначальная длина образца, ΔL — изменение длины образца.

Сила трения (скольжения) $F_{\text{тр}} = \mu N$, где μ — коэффициент трения, N — сила реакции.

Законы сохранения в механике

Импульс силы Ft , импульс тела mv .

Закон сохранения импульса: $\sum m\vec{V} = \text{const.}$

Работа $A = FS \cos \alpha$.

Мощность $P = \frac{A}{t} = Fv \cos \alpha$.

Кинетическая энергия $E_k = \frac{mv^2}{2}$.

Потенциальная энергия тела, поднятого над Землей, $E_\Pi = mgh$.

Потенциальная энергия деформированной пружины $E_\Pi = \frac{k\Delta L^2}{2}$.

Закон сохранения энергии в механике: $\sum (E_k + E_\Pi) = \text{const.}$

Теорема об изменении кинетической энергии тела:

$$E_{k_2} - E_{k_1} = \sum A.$$

Основные положения статики

1. Алгебраическая сумма проекций всех сил, действующих на тело, на любую ось равна нулю: $\sum F = 0$.

2. Алгебраическая сумма моментов всех сил, действующих на тело, по отношению к любой точке пространства равна нулю: $\sum M = 0$.

Элементы гидравлики

Гидростатическое давление $P = \rho gh$.

Закон Архимеда: $F_A = \rho g V$, где ρ — плотность жидкости, V — объем погруженной в жидкость части тела.

Уравнение Бернулли: $P + \rho gh + \frac{\rho V^2}{2} = \text{const.}$

Основы молекулярно-кинетической теории

Количество вещества $v = \frac{m}{M} = \frac{N}{N_A}$, где m — масса вещества; M — молярная масса вещества; N — число структурных элементов (атомов, молекул) вещества; N_A — постоянная Авогадро.

Основное уравнение МКТ для идеального газа: $P = \frac{1}{3} m_0 n < v^2 >$, где P — давление; m_0 — масса молекулы; n — концентрация; $< v >$ — средняя квадратическая скорость.

Уравнение МКТ для идеального газа $P = nkT$, T — абсолютная температура газа.

Уравнение Больцмана $E_a = \frac{3}{2} kT$, где k — постоянная Больцмана; $E_{\text{п}}$ — энергия поступательного движения молекулы.

Средняя квадратическая скорость молекул $< v_{\text{кв}} > = \sqrt{\frac{3RT}{M}}$.

Средняя арифметическая скорость $< v > = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}}$.

Основные формулы термодинамики

Уравнение Клапейрона — Менделеева: $pV = vRT$.

Первый закон термодинамики: $Q = A + \Delta U$.

Работа при изобарном процессе $A = p\Delta V$.

Работа при изотермическом процессе $A = vRT \ln \left(\frac{v_2}{v_1} \right)$.

Внутренняя энергия идеального газа $U = \frac{i}{2} vRT$.

Связь между удельной и молярной теплоемкостями: $c = \frac{C}{M}$, где C — молярная теплоемкость.

Молярная теплоемкость газа при постоянном объеме $C_v = \frac{i}{2} R$.

Молярная теплоемкость газа при постоянном давлении

$$C_p = C_v + R = \frac{i+2}{2} R.$$

Уравнение Пуассона для адиабатного процесса: $PV^\gamma = \text{const.}$, где $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$.

КПД тепловой машины $\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}$, для цикла Карно $\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$.

Изменение энтропии тела в любом обратимом процессе, переводящим его из состояния A в состояние B , $S_B - S_A = \int_A^B \frac{dQ}{T}$.

Второй закон термодинамики: *энтропия замкнутой системы при любых происходящих в ней процессах не уменьшается — она возрастает при необратимых процессах и остается постоянной в случае обратимых процессов.*

Количество теплоты, необходимой для нагревания тела, $Q = cm(T_2 - T_1)$.

Количество теплоты, необходимой для плавления кристаллического тела, $Q = \lambda m$.

Количество теплоты, выделяемой при кипении тела, $Q = rm$.

Количество теплоты, выделяемой при сгорании топлива, $Q = qm$.

Относительная влажность воздуха $\Phi = \frac{\rho}{\rho_n} = \frac{P}{P_n}$.

Основные формулы электростатики

Закон Кулона: $F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$, где $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$.

Напряженность электрического поля $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$.

Напряженность электрического поля от точечного заряда $E = k \frac{q}{r^2}$.

Потенциал электрического поля от точечного заряда $\phi = k \frac{q}{r}$.

Работа электрического поля по перемещению заряда

$$A = q(\phi_1 - \phi_2) = qU.$$

Связь между напряженностью и напряжением для однородного поля: $E = \frac{U}{d}$.

Электроемкость уединенного проводника $C = \frac{q}{\phi}$.

Электроемкость конденсатора $C = \frac{q}{U}$.

Электроемкость плоского конденсатора $C = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{d}$.

Электроемкость проводящей сферы $C = 4\pi\epsilon\epsilon_0 R$.

Электроемкость батареи конденсаторов, соединенных параллельно, $C = \sum C_i$.

Электроемкость батареи конденсаторов, соединенных последовательно, $\frac{1}{C} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i}$.

Энергия электрического поля конденсатора

$$W = \frac{qU}{2} = \frac{q^2}{2C} = \frac{CU^2}{2},$$

Объемная плотность энергии электрического поля

$$\omega = \frac{W}{V} = \frac{1}{2}\epsilon\epsilon_0 E^2.$$

Основные формулы постоянного электрического тока

Сила электрического тока $I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = qnS < V >$.

Закон Ома для участка цепи $I = \frac{U}{R}$.

Сопротивление однородного проводника $R = \rho \frac{L}{S}$.

Зависимость удельного сопротивления проводника от температуры: $\rho = \rho_0(1 + \alpha t)$.

Общее сопротивление n последовательно соединенных резисторов $R = \sum_{i=1}^n r_i$.

Общее сопротивление n параллельно соединенных резисторов $\frac{1}{R} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{r_i}$.

Закон Ома для замкнутой цепи: $I = \frac{\epsilon}{r + R}$.

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

Мощность электрического тока $P = IU = I^2 R = \frac{U^2}{R}$.

Закон Фарадея для электролиза: $m = kq = kIt = \frac{1}{F} \cdot \frac{M}{n} \cdot It$.

Основные формулы магнитного поля

Модуль магнитной индукции на расстоянии r от прямолинейного бесконечного проводника с током $B = \frac{\mu\mu_0 I}{2\pi r}$.

Магнитная индукция в центре витка $B = \frac{\mu\mu_0 I}{2r}$.

Индукция магнитного поля на оси соленоида: $B = \mu\mu_0 nI$.

Сила Ампера $F_A = BIL \sin \alpha$.

Сила Лоренца $F_L = Bqv \sin \alpha$.

Основные формулы электромагнитной индукции

Магнитный поток $\Phi = BS \cos \phi$.

Закон электромагнитной индукции: $\delta = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$. $\delta = BLV \sin \alpha$.

Связь между магнитным потоком и током: $\Phi = LI$.

ЭДС самоиндукции $\delta = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$.

Индуктивность соленоида $L = \mu\mu_0 n^2 V$.

Энергия магнитного поля $W = \frac{LI^2}{2}$.

Основные формулы механических колебаний и волн

Уравнение механических колебаний: $X = A \sin(\omega t + \phi_0)$.

Циклическая частота $\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T}$.

Период колебаний пружинного маятника $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$.

Период колебаний математического маятника $T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$.

Длина волны $\lambda = VT = \frac{V}{\nu}$.

Основные формулы электромагнитных колебаний и волн

Индуктивное сопротивление $X_L = \omega L$.

Емкостное сопротивление $X_C = \frac{1}{\omega C}$.

Период колебаний в колебательном контуре $T = 2\pi\sqrt{LC}$.

Полное внутреннее сопротивление участка цепи из последовательно соединенных: резистора, катушки и конденсатора в цепи переменного тока: $Z = \sqrt{R^2 + (x_L - x_c)^2}$.

Действующее значение тока $I = \frac{I_{\max}}{\sqrt{2}}$ и напряжения $U = \frac{U_{\max}}{\sqrt{2}}$.

Коэффициент трансформации $k = \frac{n_1}{n_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1}$.

КПД трансформатора $\eta = \frac{P_2}{P_1}$.

Длина электромагнитной волны $\lambda = CT = \frac{C}{\nu}$.

Основные формулы геометрической оптики

Закон отражения света: $\alpha = \beta$.

Закон преломления света: $\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = n_2 = \frac{n_2}{n_1}$, $n_1 = \frac{C}{V_1}$, $n_2 = \frac{C}{V_2}$.

Предельный угол полного внутреннего отражения $\sin \gamma_0 = \frac{1}{n}$.

Оптическая сила линзы $D = \frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}$.

Линейное увеличение линзы $\Gamma = \frac{h}{H} = \frac{f}{d}$.

Волновые свойства света

Оптическая разность хода двух лучей $\Delta = n_2 L - n_1 L$.

Разность фаз двух волн с одинаковой длиной волны $\Delta\phi = \frac{2\pi\Delta}{\lambda}$.

Условие интерференционного максимума: $\Delta = \pm k\lambda$.

Условие интерференционного минимума: $\Delta = \pm(2k + 1)\frac{\lambda}{2}$.

Формула дифракционной решетки: $d \sin \phi = \pm k\lambda$.

Элементы теории относительности

$L = L_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$, где L — длина стержня в инерциальной системе отсчета, относительно которой стержень движется со скоростью v ; L_0 — собственная длина, т. е. длина стержня в системе отсчета, относительно которой он покойится.

$$t = \frac{t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$

где t — промежуток времени между событиями, измеренными по часам в неподвижной системе отсчета; t_0 — «собственное время», измеренное по часам в системе отсчета, движущейся вместе с часами относительно неподвижной системы отсчета.

Закон сложения скоростей в СТО (специальная теория относительности):

$$v = \frac{v' + V}{1 + \frac{v'V}{c^2}},$$

где v' — скорость тела относительно неподвижной инерциальной системы отсчета; V — скорость подвижной системы отсчета относительно неподвижной; v — скорость тела относительно подвижной системы отсчета.

Зависимость массы от скорости: $m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$.

Релятивистская энергия $E = mc^2$.

Кинетическая энергия $E_k = mc^2 - m_0 c^2$.

Элементы квантовой физики

Энергия фотона $E_\phi = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$.

Импульс фотона $P_\phi = mC = \frac{E}{C} = \frac{h\nu}{C} = \frac{h}{\lambda}$.

Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта: $h\nu = A_{\text{вых}} + E_k$.

Давление света $P = (1 + \rho) \frac{E_\phi}{C}$.

Физика атома

Квантовое условие для стационарных орбит: $mv_n r_n = \frac{n\hbar}{2\pi}$.

Радиус n -ой Боровской орбиты $r_n = \alpha_0 n^2$.

Скорость электрона на n -ой Боровской орбите $v_n = \frac{2,2 \cdot 10^6}{n} \left(\frac{\text{м}}{\text{с}} \right)$.

Формула Бальмера — Ритца: $\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right)$.

Физика атомного ядра

Закон радиоактивного распада: $N = N_0 e^{-\lambda t}$, где $\lambda = \frac{\ln 2}{T}$.

Энергия связи ядра $E_{\text{св}} = \Delta mc^2$.

Литература

1. Жилко, В. В. Физика : учеб. пособие для 10-го кл. / В. В. Жилко, А. В. Лавриенко, Л. Г. Маркович. Мн., 2001.
2. Жилко, В. В. Физика : учеб. пособие для 11-го кл. / В. В. Жилко, А. В. Лавриенко, Л. Г. Маркович. Мн., 2002.
3. Исаченкова, Л. А. Физика. 7 (6) класс / Л. А. Исаченкова, Ю. Д. Лещинский. Мн., 2004.
4. Исаченкова, Л. А. Физика : учеб. пособие для 8-го кл. / Л. А. Исаченкова, Ю. Д. Лещинский. Мн., 2005.
5. Исаченкова, Л. А. Физика. 9 класс / Л. А. Исаченкова, Г. В. Пальчик. Мн., 2005.
6. Справочное пособие для абитуриентов. Программы и содержание заданий вступительных экзаменов по физике, математике, русскому языку и литературе / сост. С. В. Белов и др.; под общ. ред. С. В. Белова. М., 2001.
7. Физика. Большой справочник для школьников и поступающих в вузы / Д. И. Дик и др. М., 1999.
8. Физика. Теория и технология решения задач : учеб. пособие / В. А. Бондарь и др. Мн., 2003.
9. Физический энциклопедический словарь. М., 1987.

Содержание

Предисловие	3
1. МЕХАНИКА	
1.1. Механика	4
1.1.1. Относительность механического движения	4
1.1.2. Система отсчета	4
1.1.3. Материальная точка	5
1.1.4. Траектория	5
1.1.5. Путь и перемещение	5
1.1.6. Скорость	6
1.1.7. Тест «Равномерное движение»	6
1.1.8. Ускорение	9
1.1.9. Равномерное и прямолинейное равноускоренное движение	9
1.1.10. Тест «Равноускоренное движение»	10
1.1.11. Движение материальной точки по криволинейной траектории	11
1.1.12. Движение по окружности с постоянной по модулю скоростью	12
1.1.13. Тест «Криволинейное движение. Движение по окружности»	13
1.1.14. Принцип относительности Галилея	15

1.2 Динамика	15
1.2.1. Сила	15
1.2.2. Первый закон Ньютона	16
1.2.3. Масса	16
1.2.4. Второй закон Ньютона	17
1.2.5. Третий закон Ньютона	17
1.2.6. Закон всемирного тяготения	17
1.2.7. Сила тяжести. Ускорение свободного падения	18
1.2.8. Движение искусственных спутников. Первая космическая скорость	18
1.2.9. Сила упругости	18
1.2.10. Закон Гука	19
1.2.11. Вес тела, движущегося с ускорением по вертикали	19
1.2.12. Сила трения. Коэффициент трения	20
1.2.13. Тест «Динамика прямолинейного движения тел»	20
1.2.14. Тест «Динамика вращательного движения. Закон всемирного тяготения»	22
1.3 Законы сохранения	23
1.3.1. Импульс тела	24
1.3.2. Закон сохранения импульса	25
1.3.3. Тест «Импульс. Закон сохранения импульса»	26
1.3.4. Работа. Мощность	28
1.3.5. Энергия	28
1.3.6. Кинетическая энергия	29
1.3.7. Потенциальная энергия	29
1.3.8. Тест «Работа. Мощность. Механическая энергия»	30
1.3.9. Закон сохранения энергии в механике	32
1.3.10. Тест «Законы сохранения»	32
1.4. Статика	34
1.4.1. Момент силы	34
1.4.2. Условия равновесия тела	35
1.4.3. Центр тяжести и центр масс тела	35
1.4.4. Тест «Элементы статики»	36
1.4.5. Закон Паскаля	38
1.4.6. Архимедова сила для жидкости и газов	38
1.4.7. Уравнение Бернулли	39
1.4.8. Итоговый тест по механике	40
2. ЭЛЕКТРОДИНАМИКА	
2.1. Электростатика	43
2.1.1. Электрический заряд и его свойства	43
2.1.2. Закон сохранения заряда	43
2.1.3. Электрическое поле	44
2.1.4. Закон Кулона	44
2.1.5. Напряженность электрического поля	45
2.1.6. Силовые линии	46
2.1.7. Принцип суперпозиции	46

2.1.8. Теорема Гаусса	47
2.1.9. Тест «Закон Кулона. Напряженность электростатического поля»	47
2.1.10. Работа в электростатическом поле	50
2.1.11. Разность потенциалов. Потенциал	51
2.1.12. Потенциал точечного заряда и системы точечных зарядов	51
2.1.13. Эквипотенциальная поверхность	52
2.1.14. Связь между напряжением и напряженностью для однородного электростатического поля	52
2.1.15. Проводники в электрическом поле	53
2.1.16. Диэлектрики в электрическом поле	53
2.1.17. Диэлектрическая проницаемость	54
2.1.18. Электроемкость	54
2.1.19. Конденсаторы	55
2.1.20. Электроемкость плоского конденсатора	55
2.1.21. Электроемкость уединенной сферы	56
2.1.22. Соединение конденсаторов	56
2.1.23. Энергия электрического поля	56
2.1.24. Тест «Потенциал. Разность потенциалов. Электроемкость»	57
2.2. Постоянный электрический ток	58
2.2.1. Электрический ток	59
2.2.2. Условия возникновения электрического тока	60
2.2.3. Сила тока	60
2.2.4. Закон Ома для участка цепи. Закон Ома в дифференциальной форме	60
2.2.5. Сопротивление	61
2.2.6. Последовательное и параллельное соединение проводников	61
2.2.7. Измерение силы и напряжения электрического тока	62
2.2.8. Работа и мощность постоянного тока	63
2.2.9. Электродвижущая сила	63
2.2.10. Закон Ома для замкнутой цепи. Закон Ома для участка цепи, содержащего ЭДС	64
2.2.11. Законы Кирхгофа	65
2.2.12. Источники тока	65
2.2.13. Тест «Законы постоянного тока»	66
2.2.14. Тест «Работа и мощность постоянного тока»	68
2.3. Магнитное поле постоянного тока	70
2.3.1. Взаимодействие токов	70
2.3.2. Индукция магнитного поля	70
2.3.3. Силовые линии магнитного поля	71
2.3.4. Сила Ампера	72
2.3.5. Сила Лоренца	72
2.3.6. Тест «Магнитное поле. Силы Ампера и Лоренца»	73
2.3.7. Магнитный поток	75
2.3.8. Электромагнитная индукция	75
2.3.9. Вихревое электрическое поле	76

2.3.10. Закон электромагнитной индукции (закон Фарадея)	76
2.3.11. Правило Ленца	77
2.3.12. ЭДС индукции в движущихся проводниках	77
2.3.13. Самоиндукция	77
2.3.14. Индуктивность	78
2.3.15. Энергия магнитного поля	79
2.3.16. Электромагнитное поле	79
2.3.17. Электрические машины постоянного тока	80
2.3.18. Тест «Электромагнитная индукция. Энергия магнитного поля»	80
3. КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ	
3.1. Механические колебания	83
3.1.1. Колебательное движение	83
3.1.2. Амплитуда, частота, период и фаза колебаний	83
3.1.3. Свободные колебания	84
3.1.4. Собственные колебания	84
3.1.5. Колебание груза на пружине	84
3.1.6. Математический маятник	85
3.1.7. Превращение энергии при колебательном движении	85
3.1.8. Затухающие колебания. Вынужденные колебания	85
3.1.9. Резонанс	86
3.1.10. Автоколебания	86
3.1.11. Тест «Механические колебания»	87
3.2. Электромагнитные колебания	89
3.2.1. Свободные электромагнитные колебания в контуре	89
3.2.2. Превращение энергии в колебательном контуре	89
3.2.3. Собственная частота колебаний в контуре	90
3.2.4. Переменный ток	90
3.2.5. Активное сопротивление в цепи переменного тока	90
3.2.6. Действующее значение напряжения и силы переменного тока	91
3.2.7. Индуктивность в цепи переменного тока	91
3.2.8. Емкость в цепи переменного тока	92
3.2.9. Закон Ома для переменного тока	92
3.2.10. Резонанс в цепи переменного тока	93
3.2.11. Мощность в цепи переменного тока	93
3.2.12. Трансформатор	93
3.2.13. Передача электроэнергии	94
3.2.14. Тест «Электромагнитные колебания»	95
3.3. Волновое движение	95
3.3.1. Распространение колебаний. Волны	97
3.3.2. Звуковые волны	98
3.3.3. Элементы акустики	98
3.3.4. Эхолокация	99
3.3.5. Электромагнитные волны	100
3.3.6. Свойства электромагнитных волн	100

3.3.7. Энергия электромагнитной волны	101
3.3.8. Принцип радиосвязи	101
3.3.9. Радиолокация	102
4. ОПТИКА	
4.1. Геометрическая оптика	103
4.1.1. Прямолинейное распространение света	103
4.1.2. Скорость света	103
4.1.3. Принцип Гюйгенса. Принцип Ферма	103
4.1.4. Закон отражения света. Закон преломления света	104
4.1.5. Полное отражение	104
4.1.6. Линзы	105
4.1.7. Формула линзы	106
4.1.8. Оптические приборы	106
4.1.9. Тест «Геометрическая оптика»	107
4.2. Волновая оптика	109
4.2.1. Дисперсия света	109
4.2.2. Спектральный анализ	110
4.2.3. Интерференция	111
4.2.4. Интерференция света	112
4.2.5. Принцип Гюйгенса — Френеля	113
4.2.6. Дифракция. Дифракционная решетка	113
4.2.7. Поляризация света	114
4.2.8. Тест «Волновая оптика»	114
4.3. Элементы теории относительности	114
4.3.1. Принцип относительности в классической механике	117
4.3.2. Опыт Майкельсона	117
4.3.3. Специальная теория относительности	118
4.3.4. Преобразования Лоренца	118
4.3.5. Следствие из преобразований Лоренца	119
4.3.6. Сложение скоростей	119
4.3.7. Зависимость массы от скорости	119
4.3.8. Связь между массой и энергией. Кинетическая энергия в релятивистской динамике	120
Коды ответов к тестам	121
Приложение	122
Литература	132