ФИЗИКА

Учебник для 10 класса школ общего среднего образования

Рекомендовано к изданию Министерством народного образования Республики Узбекистан

Новое издание



Ташкент
2022

скачано с сайта www.idum.uz

УДК 53(075.3)
ББК 22.3я72
Ф 58

Ф 58 Физика 10 [Текст] : Учебник для 10 класса/. – Ташкент: Республиканский центр образования, 2022. – 192 с.

ISBN 978-9943-8454-6-6

УДК 53(075.3)
ББК 22.3я72

СОСТАВИТЕЛИ:
К. А. Турсунметов, Ш. Н. Усмонов,
Ж. А. Рахматов, Д. Б. Хомидов

РЕЦЕНЗЕНТЫ

Б. А. Юлдошов – преподаватель кафедры теоретической физики Термезского государственного университета;

Т. Х. Жумаев – главный специалист Научно-учебного практического центра при Государственном тестовом центре;

А. Худойбердиев – методист отдела стандарта и оценки Республиканского центра образования;

А. Ж. Умаров – учитель физики высшей категории школы №5 Китабского района Кашкадарьинской области.

Б. Т. Турапов – учитель физики высшей категории 6-го ИДУМИ Шахрисабзского района Кашкадарьинской области;

М. К. Умаров – учитель физики высшей категории школы № 46 Шахриханского района Андижанской области;

М. А. Аскаров – учитель физики 1 класса 10 школы Каракульского района Бухарской области;

И. А. Раупов – учитель физики высшей категории школы №27 Гиждуванского района Бухарской области.

Условные обозначения:

 – обобщающие вопросы

 – упражнения

 – практические задания

 – задания на логическое мышление

 – дополнительные задания

Издан за счёт средств Республиканского целевого книжного фонда.
Оригинальный макет и концепция дизайна разработаны Республиканским центром образования.

ISBN 978-9943-8454-6-6

© Республиканский центр образования, 2022

скачано с сайта www.idum.uz

СОДЕРЖАНИЕ

ГЛАВА I. ДИНАМИКА. ЭЛЕМЕНТЫ СТАТИКИ

Тема 1. Сложение сил 8
Тема 2. Центростремительная сила 11
Тема 3. Движение в гравитационном поле. 14
Тема 4. Решение задач 17
Тема 5. Зависимость веса тела от его движения. 19
Тема 6. Движение тела под действием нескольких сил 23
Тема 7. Решение задач. 26
Тема 8. Движение тела по наклонной плоскости 28
Тема 9. Работа по перемещению тела по наклонной плоскости. Коэффициент полезного действия наклонной плоскости (КПД) 31
Тема 10. Решение задач 33
Тема 11. Лабораторная работа: *Определение коэффициента полезного действия наклонной плоскости* 35
Тема 12. Центр масс. Виды равновесия. Момент силы 36
Тема 13. Простые механизмы, работающие на основе правила моментов 40
Тема 14. Решение задач 43
Проектная работа: Изготовление простых механизмов 46

ГЛАВА II. МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

Тема 15. Механические колебания. 48
Тема 16. Пружинный и математический маятник 52
Тема 17. Лабораторная работа: *Определение ускорения свободного падения с помощью математического маятника* 54
Тема 18. Механические волны 55
Тема 19. Звуковые волны 57
Тема 20. Решение задач 61

ГЛАВА III. ГИДРОДИНАМИКА И АЭРОДИНАМИКА

Тема 21. Движение жидкостей и газов 66
Тема 22. Использование в технике зависимости давления движущегося газа и жидкости от скорости 70
Тема 23. Решение задач 72

ГЛАВА IV. ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЕ ПОЛЕ

Тема 24. Принцип суперпозиции напряжённости электрического поля 76
Тема 25. Электрическое поле заряженного шара 80
Тема 26. Решение задач 84
Тема 27. Работа, совершаемая при перемещении точечного заряда в электростатическом поле 85
Тема 28. Потенциальная энергия точечного заряда, находящегося в электрическом поле 87

скачано с сайта www.idum.uz

Тема 29. Энергия электрического поля 91
Тема 30. Практическое занятие. Превращение энергии из одного вида в другой 94
Тема 31. Решение задач 95

ГЛАВА V. ЗАКОНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Тема 32. Сила тока и плотность тока. 98
Тема 33. Закон Ома для полной цепи. 103
Тема 34. Решение задач 107
Тема 35. Лабораторная работа. *Определение ЭДС и внутреннего сопротивления источника тока* 109
Тема 36. Зависимость сопротивления металлических проводников от температуры 110
Тема 37. Решение задач 115
Проектная работа. Альтернативные источники электричества 117

ГЛАВА VI. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В РАЗЛИЧНЫХ СРЕДАХ

Тема 38. Электрический ток в жидкостях 122
Тема 39. Первый и второй законы Фарадея. 125
Тема 40. Решение задач 129
Тема 41. Использование электролиза в быту и в технике 130
Тема 42. Электрический ток в газах. Электрический ток в вакууме 132
Тема 43. Полупроводники и их отличие от металлов 137
Тема 44. Электрическая проводимость полупроводников 139
Тема 45. Полупроводниковые приборы и их применение в технике 142
Тема 46. Лабораторная работа. *Изучение вольт-амперной характеристики полупроводникового диода* 147

ГЛАВА VII. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Тема 47. Индукция магнитного поля. Магнитное поле проводников с током 150
Тема 48. Действие магнитного поля на проводник с током 154
Тема 49. Взаимодействие проводников с током 159
Тема 50. Работа, совершаемая при перемещении проводника с током в магнитном поле 161
Тема 51. Движение заряженной частицы в магнитном поле 164
Тема 52. Электродвигатель постоянного тока 167
Тема 53. Решение задач 169
Тема 54. Электромагнитная индукция 171
Тема 55. Практическое занятие. Изучение явления электромагнитной индукции 174
Тема 56. Самоиндукция. Индуктивность 176
Тема 57. Решение задач 179
Тема 58. Энергия магнитного поля тока. Магнитные свойства веществ 180
Тема 59. Решение задач 184

Использованная литература 190

ВВЕДЕНИЕ

Сегодня при стремительном развитии науки и техники, внедрении в практику цифровой экономики, быстром обновлении знаний, большое внимание уделяется практическому применению теоретических знаний, полученных учащимися в общеобразовательных школах.

В проводимых в нашем обществе реформах от специалистов требуется не только наличие знаний, но и любознательность и исследовательские способности. Поэтому привлечение учащихся к учебно-исследовательской деятельности и развитие у них исследовательских навыков стало одной из актуальных проблем.

В частности, преподавание физики предусматривает формирование и развитие у учащихся потенциала применения физических знаний на практике путём обобщения их практической деятельности с развитием техники и роли науки в жизни, приобретения необходимых научных знаний.

В процессе преподавания предметов в общеобразовательных школах обучение в связи с развитием науки и техники, инженерии, математики и быта (STEAM-подход) является актуальным вопросом организации учебного процесса.

STEAM направлен на укрепление междисциплинарной связи и практического подхода в обучении учащихся в международном масштабе с учётом требований времени. Физика преподается в 1-6 классах в рамках «Естественных наук» (биология, химия, физика, география). За это время учащиеся знакомятся с такими темами, как Солнце, Земля, Луна и её значение, погода, времена года, окружающие нас вещи: бытовая техника, школьные принадлежности, продукты питания, использование газа, бытовое электрооборудование, соблюдение правил безопасности, предметы и вещества, состояния воды, использование термометра, ежедневное наблюдение за погодой, периодическая смена дня и ночи, и другие понятия.



Физика как непрерывный курс в 7, 8, 9, 10, 11 классах, состоящий из разделов «Механика», «Основы молекулярной физики и термодинамики», «Электродинамика», «Оптика», «Атомная и ядерная физика», изучается спиралеобразно, а у учащихся формируются навыки практического применения.

Учебник помогает развивать научное мировоззрение учащихся через наблюдение и анализ процессов и явлений в природе, умение правильно пользоваться инструментами при изучении физических явлений, выражать физические понятия и величины математическими формулами, знакомит их с достижениями в области науки и их практическим применением с целью надлежаще использовать их в будущем. В учебнике изучаются разделы «Динамика. Элементы статики», «Механические колебания и волны», «Гидродинамика», «Электростатическое поле», «Законы постоянного тока», «Электрический ток в различных средах», «Магнитное поле».

Среди естественных наук наибольшее значение для развития техники имеет физика, так как законы физики широко используются в технике. Новые открытия в области физики приводят к совершенствованию существующих методик или созданию новых. Развитие техники, в свою очередь, ведёт к дальнейшему развитию науки.

Проведение практических экспериментов, приведённых в учебнике, проектно-ориентированных заданий, решение задач, ответы на логические вопросы помогут вам понять состояние природной и социальной среды, экологические и человеческие проблемы, принять участие в поиске их решения.

ГЛАВА I



ДИНАМИКА. ЭЛЕМЕНТЫ СТАТИКИ

В этой главе вы познакомитесь со следующими темами:

- сложение сил;
- центростремительная сила;
- движение в гравитационном поле;
- зависимость веса тела от вида движения;
- движение тел под действием нескольких сил;
- движение тела по наклонной плоскости;
- работа, совершаемая при перемещении тела по наклонной плоскости; коэффициент полезного действия наклонной плоскости;
- центр масс; виды равновесия; момент силы;
- простые механизмы, работающие на основе правила моментов сил.

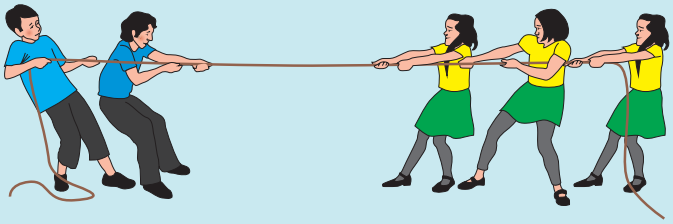
ТЕМА 1 СЛОЖЕНИЕ СИЛ

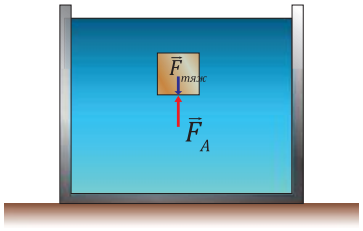
Какая команда выиграет?

a) если каждый мальчик тянет верёвку с силой 300 N, а каждая девочка – с силой, на 50 N меньшей, чем сила каждого мальчика?

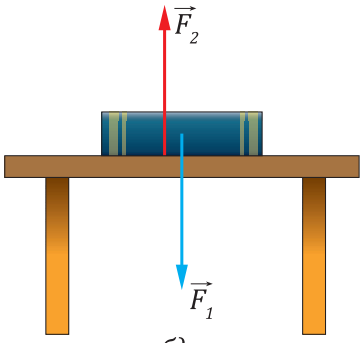
b) если один мальчик и одна девочка поменяются местами?

Ответ обоснуйте.





а)



б)

Рис. 1.1

1. Уравновешенные силы.
2. Неуравновешенные силы.
3. Равнодействующая сила и составляющие сил.

Все явления в природе подчиняются физическим законам. Взаимодействие тел между собой, их равновесие, зависят от сил, действующих на тело.

1. Уравновешенные силы

Почему припаркованный автомобиль, тело, находящееся в покое в любой точке внутри жидкости (рис. 1.1 а), предметы на столе, стоят неподвижно?

На книгу, лежащую на поверхности стола, действуют две силы (рис. 1.1 б). $\vec{F}_1$ – сила тяжести, (на рисунке она прикладывается к книге). $\vec{F}_2$ – сила, действующая на книгу вверх со стороны стола, т.е. сила реакции опоры. Эти две силы равны по величине, но направлены противоположно, поэтому их сумма равна нулю, и они *уравновешивают* друг друга.

Силы, которые не изменяют состояние покоя и скорость движения тела, называются уравновешенными силами.

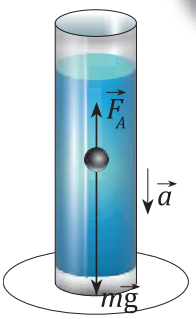
Согласно I закону Ньютона:

Если на тело не действуют дополнительные силы, оно сохраняет своё относительное состояние покоя, или продолжает своё равномерное прямолинейное движение.

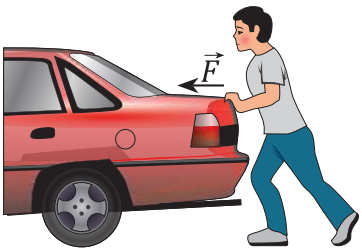
$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \ldots + \vec{F}_n = 0$ (1), то $\vec{a}$ =0 и $\vec{\upsilon}$ =const.

2. Неуравновешенные силы

В природе, кроме тел, которые находятся в состоянии покоя или движутся равномерно с неизменной скоростью, мы часто встречаем тела с переменной скоростью. Например, тело, которое начинает тонуть в воде (рис.1.2 а), автомобиль, который, двигаясь с места, набирает скорость, или поезд, который прибывает на остановку, снижая скорость, и тому подобные примеры. Для приведения в движение автомобиля, который остановился из-за отсутствия топлива, необходимо приложить к нему неуравновешенную силу (рис.1.2 б).



а)



б)

Рис. 1.2

Силы, которые становятся причиной изменения скорости тела, называются неуравновешенными силами.

3. Равнодействующая сила и составляющие силы

В природе мы почти не встречаем движение тела под отсутствием только одной силы. В большинстве случаев на тело действуют одновременно несколько сил. Для характеристики действия этих сил на тело введена величина, называемая равнодействующей (результирующей) этих сил (рис.1.3). $\vec{F}_x = |x_2 - x_1|$ $\vec{F}_y = |y_2 - y_1|$

Векторная сумма сил, действующих на тело, называется равнодействующей этих сил.

Если на тело одновременно действует несколько сил, то движение тела изменяется в зависимости от направления и модуля этих сил. Поэтому, в определении равнодействующей сил, мы должны учитывать их направление и модуль. Равнодействующая сила находится так:

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \ldots + \vec{F}_n \qquad (2)$$

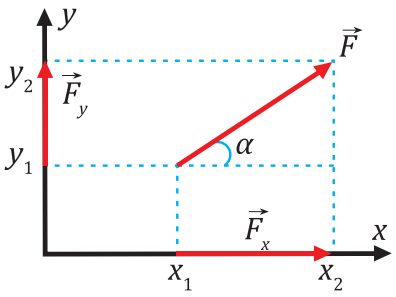


Рис. 1.3

Здесь $\vec{F}_1, \vec{F}_2, \ldots \vec{F}_n$ являются составляющими силами.

Пусть на тело действуют две силы $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$.

В общем случае результирующая сила находится по формуле:

$$F = \sqrt{F_1^2 + F_2^2 + 2F_1F_2\cos\alpha}\,. \qquad (3)$$

Здесь $F_1 = |\vec{F}_1|$, $F_2 = |\vec{F}_2|$, α – угол между $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$.

Для некоторых частных углов α формула упрощается:

1) α = 0°; если силы направлены в одном направлении $F = F_1 + F_2$;

2) $\alpha = \frac{\pi}{2}$, когда силы направлены перпендикулярно друг другу, $F = \sqrt{F_1^2 + F_2^2}$.

3) $\alpha = \pi$; если силы направлены противоположно, $F = |F_1 - F_2|$.



1. Можно ли выразить I закон Ньютона через уравновешенные силы?

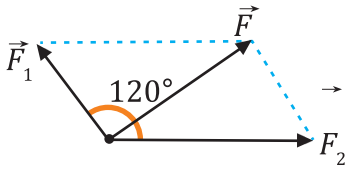
2. Парашютист спускается на парашюте равномерно и прямолинейно. Какие силы, действующие на парашютиста, уравновешены при таком его движении?

3. В чём разница между уравновешенными и неуравновешенными силами?

4. Может ли автомобиль двигаться равномерно по горизонтальной дороге при выключенном двигателе?

Образец решения задачи

Две силы по 5 N каждая, угол между которыми равен 120° приложены к одной точке тела. Найдите равнодействующую этих сил.

Дано:	Формула:	Решение:
$\alpha = 120°$ $F_1 = F_2 = 5$ N $F = ?$	$F = \sqrt{F_1^2 + F_2^2 + 2F_1F_2\cos\alpha}$ 	$F = \sqrt{5^2 + 5^2 + 2 \cdot 5 \cdot 5\cos 120°} = 5$ N **Ответ:** $F = 5$ N.

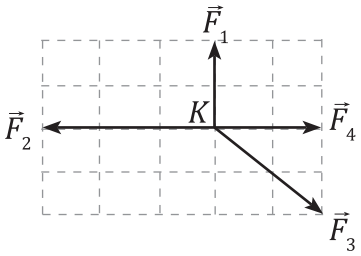
Упражнение 1

1. В соревновании по перетягиванию каната участвуют 4 спортсмена. Двое из них тянут с силами 250 N и 300 N направо, а другие два с силами 100 N и 350 N соответственно налево. Найдите модуль и направление равнодействующей силы.

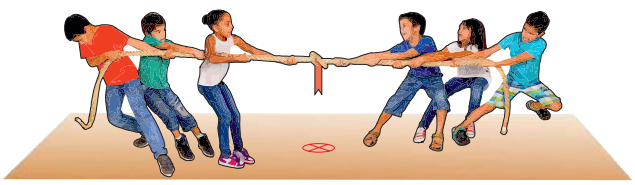
2. Каким образом должны быть направлены силы в 30 N и 40 N, чтобы они имели равнодействующую силу, равную 50 N?

3. Два конькобежца массами 60 kg и 80 kg отталкиваются друг от друга с силой 24 N. Найдите их ускорение.

4. На тело, находящееся в точке K, действуют силы, изображённые на рисунке. В каком направлении будет двигаться тело?



5. Определите по рисункам, какие силы уравновешенные, а какие – неуравновешенные. Ответ обоснуйте.





ЦЕНТРОСТРЕМИТЕЛЬНАЯ СИЛА

ТЕМА 2

1. **Силы при движении по окружности.**
2. **Движение шара, закреплённого на нити. Центробежная сила.**
3. **Центростремительные и центробежные силы в жизни и технике.**



На участке дороги с резким поворотом мы должны уменьшить скорость автомобиля. Объясните почему.

1. Силы при движении по окружности

Почему Луна движется вокруг Земли по окружности и не отдаляется от неё? (рис. 1.4)?

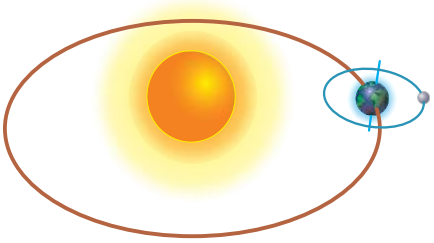


Рис. 1.4

Согласно второму закону Ньютона, тело движется с ускорением под действием внешней силы. Любое тело, движущееся со скоростью υ по окружности радиуса R, обладает ускорением, направленным в центр окружности. Т.е.

$$a_{ц.с.} = \frac{\upsilon^2}{R}. \qquad (1)$$

Это ускорение тоже возникает за счёт внешних сил. Здесь внешняя сила – центростремительная сила. Очень важно понимать, что центростремительная сила не является силой отдельного типа. Эта просто результирующая сила, которая приводит тело в движение по окружности.

Примерами центростремительных сил являются:

– сила натяжения нити при круговом движении тела, закреплённого на нити;

– силы, заставляющие автомобиль поворачиваться при движении по закруглённой части дороги, и т. д.

Применим II закон Ньютона относительно центростремительной силы ($F_{ц.с}$):

$$a_{ц.с.} = \frac{F_{ц.с.}}{m}. \qquad (2)$$

Из формул (1) и (2) получим формулу $F_{ц.с.} = \frac{m \cdot \upsilon^2}{R}$. (3)

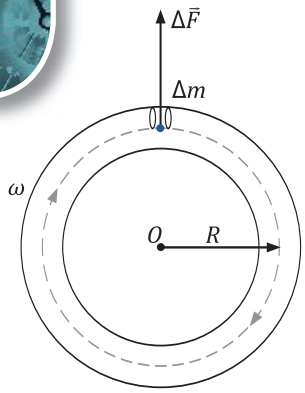


Рис. 1.5

Учитывая, что линейная скорость тела при движении по окружности равна $\upsilon = \omega R$, мы можем выразить центростремительную силу следующим образом (рис. 1.5):

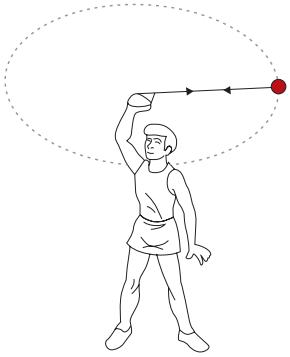
$$F_{ц.с.} = m\omega^2 R\,. \qquad (4).$$

Равномерное движение по окружности может возникать также под воздействием нескольких сил, но их векторная сумма будет направлена вдоль радиуса к центру. Исходя из вышеизложенных суждений, можно дать следующее определение центростремительной силе:

Центростремительная сила – сила, которая направлена под прямым углом к вектору линейной скорости тела и которая приводит его к круговому движению.



а)



б)

Рис. 1.6

Центростремительная сила изменяет только направление линейной скорости, но не изменяет его модуль.

2. Круговое движение шара, закреплённого на нити

При круговом движении шара, закреплённого на нити, тоже действует центростремительная сила (рис. 1.6 а). Она направлена по длине нити к центру окружности. На рисунке 1.6 б показано, с какой силой действует нить на шар. Согласно III закону Ньютона, шар тоже действует на нить с силой, равной по модулю, но противоположной по направлению. Эта сила называется центробежной силой ($F_{ц.б.}$). Она направлена от центра окружности по радиусу в сторону шара и через нить действует на руку.

$$F_{ц.б.} = \frac{m \cdot \upsilon^2}{R} \quad \text{или} \quad F_{ц.б.} = m\omega^2 R \qquad (5)$$

3. Проявление центростремительных и центробежных сил в жизни и технике

Мы можем наблюдать проявления центробежных сил при вращательном движении тел, а также на участках дорог с поворотом (рис. 1.7).



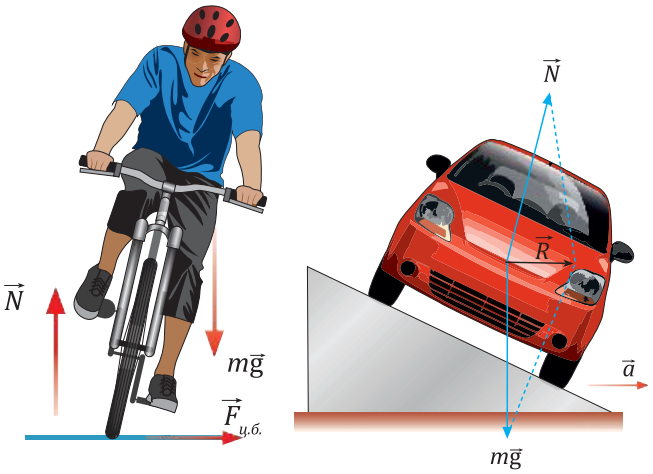


Рис. 1.7



1. Ведёрко, наполненное водой, раскручивают в вертикальной плоскости. При этом вода не выливается из ведёрка. Почему? Ответ обоснуйте.

2. Приведите примеры центростремительной силы из природы.

3. В каких случаях в жизни и технике используются центробежные силы?

Образец решения задачи

Автомобиль массой 1 t движется по окружности радиусом 100 m с постоянной скоростью 20 m/s. Найдите центростремительную силу, действующую на автомобиль.

Дано:	Формула:	Решение:
$m = 1\ \text{t} = 1 \cdot 10^3\ \text{kg}$ $R = 100\ \text{m}$ $\upsilon = 20\ \text{m/s}$	$F_{\text{ц.с.}} = \frac{m\upsilon^2}{R}$	$F_{\text{ц.с.}} = \frac{1 \cdot 10^3\ \text{kg} \cdot \left(20\ \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{100\ \text{m}} = 4 \cdot 10^3\ \text{N} = 4\ \text{kN}$
$F_{\text{ц.с}} = ?$		**Ответ:** $F_{\text{ц.с.}} = 4\ \text{kN}$.

Упражнение 2

1. Объект движется равномерно по окружности. Как изменится центробежная сила, если радиус окружности увеличить в 4 раза?

2. Как изменится центростремительная сила, если скорость тела, движущегося по окружности, увеличить в 2 раза?

3. Тело массой 3 kg вращается с угловой скоростью 2 rad/s. Найдите радиус окружности, если центробежная сила равна 36 N.

4. Тело массой 12 kg вращается по окружности радиусом 0,6 m с частотой 2 Hz. Найдите центростремительную силу, действующую на тело.

5. Если трамвайный вагон массой 24 t движется со скоростью 18 km/h по кривой с радиусом 100 m, с какой силой он действует на рельсы в горизонтальном направлении? Если скорость движения увеличить вдвое, во сколько раз изменится эта сила?



Дополнительные задания

1. В какую сторону поезд должен слегка наклониться на поворотах? Объясните причину.

2. Гончар делает вазу из глины. В какой части вазы действует центростремительная сила, а в какой – центробежная?



ТЕМА 3 ДВИЖЕНИЕ В ГРАВИТАЦИОННОМ ПОЛЕ

1. Гравитационное поле.
2. Космические скорости.



Несмотря на то, что наблюдать притяжение тел к Земле очень легко, мы не замечаем притяжения тел друг к другу. Почему так происходит?

1. Гравитационное поле

Почему тела, подброшенные вверх, падают обратно на Землю (рис. 1.8)? Почему Луна, естественный спутник Земли, не удаляется от Земли?

Такие учёные, как Галилео Галилей, Исаак Ньютон и Генри Кавендиш, провели множество научных исследований притяжения тел Землёй. На движение всех тел вокруг нас влияет гравитация Земли. По закону всемирного тяготения, действует земное притяжение $F = G\frac{mM}{r^2}$.

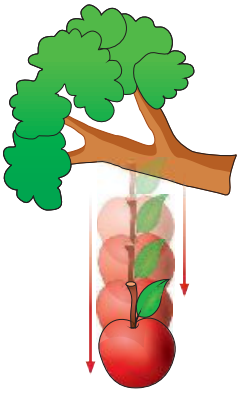


Рис. 1.8

Здесь m – масса тела, M – масса Земли, r – расстояние между телом и центром Земли.

Если подбросить предмет прямо вверх с поверхности Земли, он поднимется на определённую высоту и упадёт обратно в то место, откуда был брошен. Если предмет бросить горизонтально или наклонно к горизонту с определённой высоты, он упадет на определённом расстоянии от исходной точки.

Например, если ребенок бросит предмет горизонтально с высоты h = 20 m с начальной скоростью υ_0 = 6 m/s, он упадет на некотором расстоянии от исходной (рис. 1.9). Так как на тело действует только сила тяжести, то тело движется равномерно в горизонтальном направлении, и дальность полёта мы можем найти по формуле $S = \upsilon_0 \cdot t$. При этом $t = \sqrt{\frac{2h}{g}}$ время полёта тела.

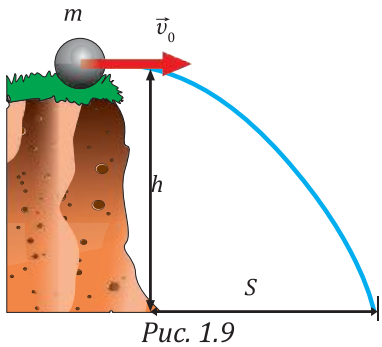
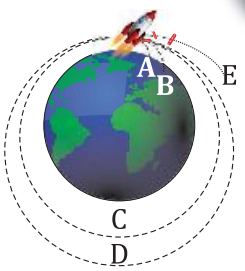


Рис. 1.9

Значит, дальность полёта тела будет равна $S = \upsilon_0 \cdot \sqrt{\frac{2h}{g}} \approx 12{,}1$ m. Если постепенно увеличить начальную скорость тела, то увеличится и дальность полёта.

2. Космические скорости

Движение искусственных спутников Земли является примером движения в гравитационном поле Земли. Если мы увеличим начальную скорость тела, брошенного с определённой высоты в горизонтальном направлении, увеличится и дальность его полёта. Когда тело достигнет определённого значения скорости, оно начнёт двигаться по круговой орбите вокруг Земли. В результате тело становится искусственным спутником Земли (рис. 1.10 *а*). Для этого необходимо сначала вывести тело на необходимую высоту над поверхностью Земли и придать ему достаточную скорость в горизонтальном направлении. Эту задачу выполняют ракетоносители. Они запускаются в вертикальном направлении на специальных космодромах. На высоте 300–400 km сопротивление воздуха практически незаметно (рис. 1.10 *б*).



а)



б)

Рис. 1.10

Минимальная скорость, необходимая для движения тела по круговой траектории вблизи поверхности Земли, называется первой космической скоростью.

При движении тела по круговой траектории в поле тяготения Земли на расстоянии, близком к поверхности Земли, центростремительная сила, действующая на тело, является силой тяготения Земли. То есть:

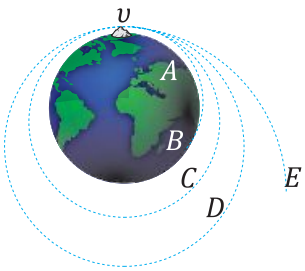
$\frac{m\upsilon^2}{R} = G\frac{Mm}{R^2}$. Отсюда определяем, что $\upsilon_1 = \sqrt{G\frac{M}{R}}$. (1)

Поскольку $g = \frac{GM}{R^2}$, формула (1) может быть записана в форме $\upsilon_1 = \sqrt{gR}$.

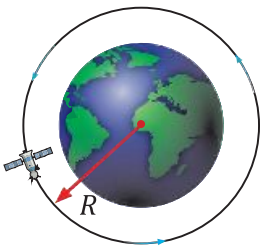
Учитывая, что радиус Земли R = 6370 km, g = 9,81 m/s^2, вычисляем численное значение первой космической скорости:

$$\upsilon_I = \sqrt{gR} = \sqrt{9{,}81 \cdot 6370000} \approx 7{,}9 \ \frac{\text{km}}{\text{s}}.$$

Спутник Земли, движущийся с такой скоростью, совершает полный оборот вокруг Земли один раз за 84 минуты 12 секунд. В зависимости от численного значения скорости тела, движущегося вокруг Земли, его траектория будет иметь разный вид (рис. 1.11 а). Если начальная скорость тела υ_0<7,9 km/s, то траектория движения будет параболой, и тело упадет обратно на Землю. Если телу придать достаточно большую скорость, то есть $\upsilon_0 = \upsilon_I \approx$ 7,9 km/s, то тело будет двигаться вокруг Земли по круговой траектории и станет её спутником (рис. 1.11 б).



а)



б)

Рис. 1.11

Вторая и третья космические скорости

Для исследования других планет Солнечной системы необходимо придать телу скорость большую, чем первая космическая скорость. Эта скорость будет называться второй космической скоростью. Вторая космическая скорость будет в $\sqrt{2}$ раза больше первой космической скорости. То есть, равна:

$$\upsilon_{II} = \sqrt{2}\upsilon_I = \sqrt{2gR} \approx 11{,}2 \ \frac{\text{km}}{\text{s}}.$$



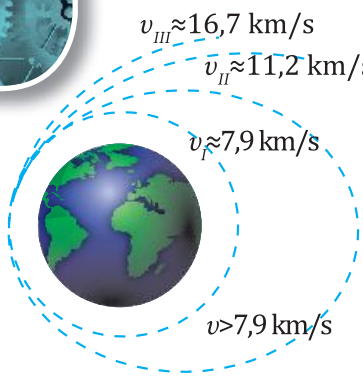


Рис. 1.12

Второй космической скоростью называется минимально необходимая скорость, при которой тело, преодолевая притяжение Земли, становится спутником Солнца.

Космический корабль должен покинуть Солнечную систему и отправиться в путешествие по галактике, чтобы исследовать далекую вселенную. Чтобы преодолеть гравитацию Солнца и покинуть Солнечную систему, космическому кораблю необходимо придать третью космическую скорость. Согласно расчётам, численное значение третьей космической скорости равно v_{III}≈16,7 km/s (рис. 1.12).

1. На какой высоте сила сопротивления воздуха практически незаметна?

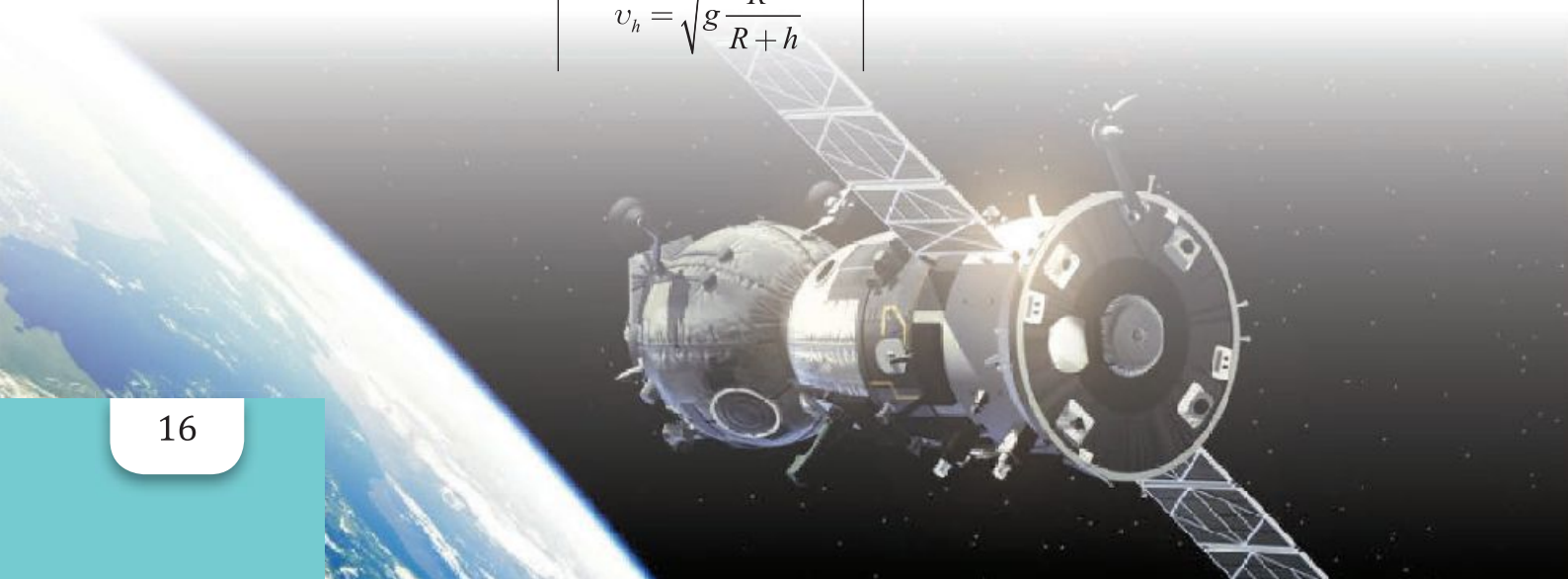
2. Каковы будут траектории тел, если они будут двигаться с соответствующими космическими скоростями?

3. Почему космические скорости различаются?

Пример решения задач

Какую скорость v_h относительно Земли должен иметь спутник, чтобы пролететь над ней по круговой орбите, расположенной в плоскости экватора на высоте h = 1600 km? Радиус Земли R = 6400 km, ускорение свободного падения на поверхности Земли принять за g_0 = 9,8 m/s².

Дано:	Формула:	Решение:
R = 6400 km = 64·10⁵ m h = 1600 km = 16·10⁵ m g_0 = 9,8 m/s² G=6,67·10⁻¹¹ $\frac{\text{Nm}^2}{\text{kg}^2}$	$F = G\frac{mM}{(R+h)^2}$; $F_{\text{ц.с.}} = \frac{mv_h^2}{(R+h)}$ $g\frac{mM}{(R+h)^2} = \frac{mv_h^2}{(R+h)}$ $v_h = \sqrt{G\frac{M}{R+h}}$; $v_h = \sqrt{g\frac{R^2}{R+h}}$	$v_h = \sqrt{9{,}8\ \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\cdot\frac{(64\cdot10^5\ \text{m})^2}{(64\cdot10^5+16\cdot10^5)\ \text{m}}} \approx 7\ \frac{\text{km}}{\text{s}}$
v_h = ?		**Ответ:** v_h≈ 7 km/s.

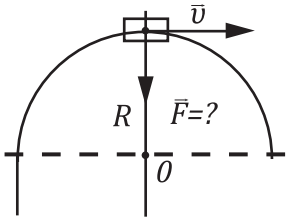


Образцы решения задач

1. С какой силой автомобиль массой 4 t действует на асфальт в горизонтальном направлении, если он движется по круговому повороту с радиусом 10 m со скоростью 36 km/h? Во сколько раз увеличится эта сила, если увеличить скорость движения автомобиля в два раза (*Рис. 1.13*)?



Рис. 1.13

Дано:	Формула:	Решение:
$\upsilon_1 = 36$ km/h $= 10$ m/s $m = 4$ t $= 4\cdot10^3$ kg $R = 10$ m $\upsilon_2 = 2\,\upsilon_1$ $F_1 = ?$ $\frac{F_2}{F_1} = ?$	$F_1 = \frac{m\,\upsilon_1^2}{R}$ $F_2 = \frac{m\,\upsilon_2^2}{R}$ 	$F_1 = \frac{4\cdot10^3\ \text{kg}\,(10\ \text{m/s})^2}{10\ \text{m}} = 40\cdot10^3\ \text{N}$ $F_2 = \frac{4\cdot10^3\ \text{kg}\,(20\ \text{m/s})^2}{10\ \text{m}} = 160\cdot10^3\ \text{N}$ $\frac{F_2}{F_1} = 4$ **Ответ:** $F_1 = 40$ kN; $\frac{F_2}{F_1} = 4$.

2. Земля вращается по орбите вокруг Солнца со средней скоростью 30 km/s. Учитывая, что радиус орбиты Земли равен $1{,}5\cdot10^8$ km, найдите массу Солнца (Рис. 1.14).

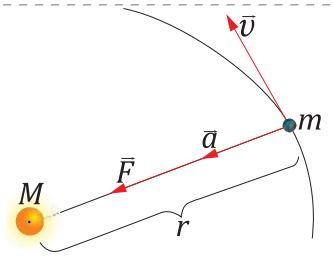


Рис. 1.14

Дано:	Формула:	Решение:
$\upsilon = 30$ km/s $= 3\cdot10^4$ m/s $R = 1{,}5\cdot10^8$ km $= 1{,}5\cdot10^{11}$ m $G = 6{,}67\cdot10^{-11}\ \text{N}\cdot\text{m}^2/\text{kg}^2$ $M = ?$	$F = G\frac{Mm}{R^2};\ F = ma$ $a = \frac{\upsilon^2}{R};\ M = \frac{R\upsilon^2}{G}$	$M = \frac{1{,}5\cdot10^{11}\ \text{m}\,\left(3\cdot10^4\ \text{m/s}\right)^2}{6{,}67\cdot10^{-11}\ \frac{\text{N}\cdot\text{m}^2}{\text{kg}^2}} \approx 2\cdot10^{30}\ \text{kg}$ **Ответ:** $M \approx 2\cdot10^{30}$ kg.





Упражнение 3

1. Найдите модуль и направление трёх сил по 4 N каждая, лежащих на одной плоскости. Углы между первой и второй и второй и третьей силами равны 60°.

2. Найдите массу тела, на которое действует сила 6 N, направленная вдоль оси OX, если уравнение движения тела имеет вид: $x = 5+2t + 3t^2$ (m).

3. Автомобиль массой 1 t движется по круговой дороге радиусом 100 m. Найдите центростремительную силу, действующую на автомобиль, если скорость автомобиля: а) 18 km/h; б) 36 km/h.

4. На льду катаются двое детей массами 40 kg и 50 kg. Первый мальчик толкает второго с силой 10 N. Каково ускорение детей?

5. Радиус планеты Сатурн составляет 60 000 km, а ускорение свободного падения – 11,44 m/s^2. Найдите первую космическую скорость на этой планете.

6. Найдите первую космическую скорость для планеты с массой в 4 раза больше массы Земли и радиусом, равным радиусу Земли.

7. Если радиус орбиты спутника уменьшить в 4 раза, как изменится период его круговой орбиты?

8. Если радиус планеты 13500 km, а ускорение свободного падения на ней равно 6 m/s^2, какова первая космическая скорость на этой планете?

9. Какова первая космическая скорость на высоте, равной трём земным радиусам, над поверхностью Земли?

Дополнительное задание

1. Какова взаимосвязь между движением авто- и мототранспорта, показанных на рисунке?



ТЕМА 5

ЗАВИСИМОСТЬ ВЕСА ТЕЛА ОТ ВИДА ДВИЖЕНИЯ

1. Вес тела.
2. Движение тела по выпуклой и вогнутой поверхности
3. Изменение веса тела по вогнутой поверхности (петля Нестерова).
4. Невесомость.

1. Вес тела

В повседневной жизни мы часто используем термин «вес тела». Что же на самом деле мы имеем в виду под весом тела? Обычно масса тела измеряется на весах. Вес тела измеряется на динамометре (рис.1.15). Масса – это скалярная величина, а вес – векторная величина. Вес тела возникает из-за того, что на него действует сила притяжения Земли. Следовательно, вес тела зависит от массы.

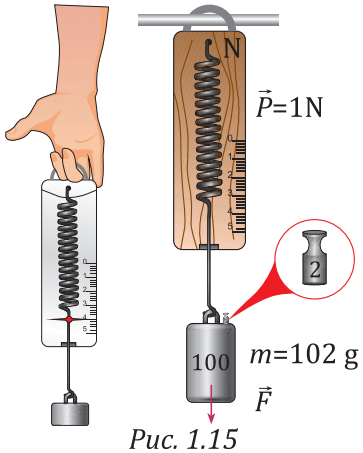


Рис. 1.15

Действие, оказываемое телом на опору или подвес, называется *весом тела*.

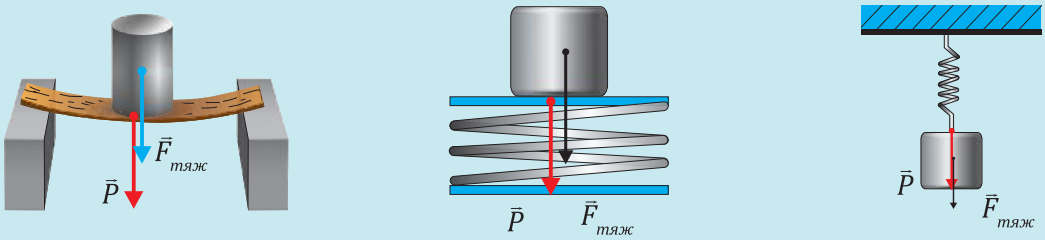


Рис. 1.16

Вес тела ($\vec{P}$), находящегося на опоре или на подвесе, в состоянии покоя равен силе тяжести ($\vec{F}_{тяж}$). (1.17–1.18).

$$\vec{P} = m\vec{g}. \qquad (1)$$

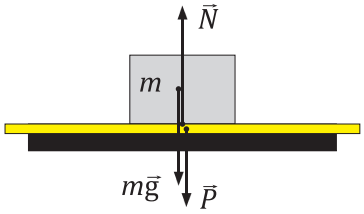


Рис. 1.17

Отличие между весом тела и силой тяжести в том, что эти силы приложены к разным телам.

Формула веса тела имеет вид:

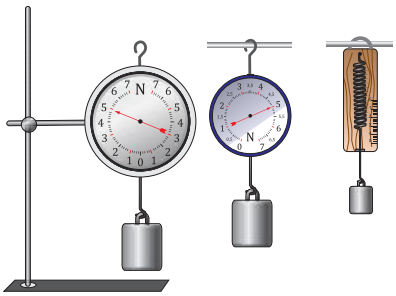
$$P = m\sqrt{g^2 + a^2 - 2ga\cos\alpha} \qquad (2)$$

α – угол между $\vec{g}$ и $\vec{a}$. Для некоторых частных значений α приводим выражение (2) к простому виду.

1) если $\alpha = 0^o$ ($\cos\alpha = 1$) , то $P = m\,(g-a)$ в равноускоренном движении вниз или в равнозамедленном движении вверх.

2) если $\alpha = 90^o$ ($\cos\alpha = 0$) , то $P = m\sqrt{g^2 + a^2}$.

3) если $\alpha = 180^o$ ($\cos\alpha = -1$), то $P = m\,(g + a)$ при равноускоренном движении вверх или в равнозамедленном движении вниз.


Рис. 1.18

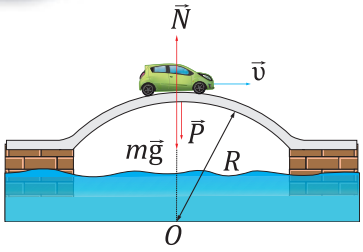


Рис. 1.19

2. Изменение веса тела на выпуклой поверхности

Рассмотрим движение автомобиля, движущегося равномерно со скоростью υ на выпуклом мосту. Автомобиль будет двигаться на самой верхней точке выпуклого моста по дуге окружности радиусом R. В верхней точке моста центростремительное ускорение автомобиля $a = \frac{\upsilon^2}{R}$ направлено вниз по вертикали. Это ускорение автомобилю даёт равнодействующая силы тяжести ($\vec{F}_{тяж} = m\vec{g}$) и силы реакции ($\vec{N}$), действующей на него со стороны моста. Согласно рисунку 1.19, из-за того, что направление сил $F_{тяж}$ и N является противоположным, равнодействующая сила будет равна их разнице.

$$F = m\,g - N. \quad \text{Следовательно,}$$

$$ma = mg - N. \qquad (3)$$

На основе третьего закона Ньютона вес автомобиля P будет равен силе реакции моста N по модулю:

$$P = -N; \quad P = mg - ma = m\left(g - \frac{\upsilon^2}{R}\right). \qquad (4)$$

Значит, в верхней точке моста вес автомобиля уменьшается. То есть $P < mg$. Также вес пассажиров, сидящих внутри автомобиля, тоже уменьшается.

3. Изменение веса тела на вогнутой поверхности

Вес пилота внутри самолёта, движущегося по криволинейной траектории в вертикальной плоскости, изменяется. Движение самолёта в нижней точке траектории можно рассматривать как движение вдоль дуги окружности. В этой точке центростремительное ускорение пилота будет направлено вертикально вверх. Движение самолёта по такой траектории называется «кольцом Нестерова».

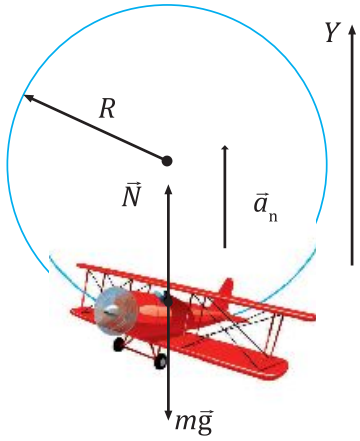


Рис. 1.20

Согласно рисунку 1.20, из-за того, что действующее на пилота направление сил $m\vec{g}$ и N является противоположным, равнодействующая сила будет равна их разнице.

То есть:

$$F = N - mg.$$

По II закону Ньютона:

$$ma = N - mg. \qquad (5).$$

В этом случае вес пилота будет равен силе реакции по модулю, $P = -N$.

$$P = mg + ma = m\left(g + \frac{\upsilon^2}{R}\right), \qquad (6)$$

то есть $P > mg$. При движении тела по вогнутой поверхности по формуле (6) его вес в нижней точке траектории увеличивается на $m\frac{\upsilon^2}{R}$. В результате тело получает *нагрузку*. При перегрузке пилот ощущает боль в теле. Нагрузка, получаемая телом, определяется отношением его веса в момент движения к весу в состоянии покоя:

$$n = \frac{mg + ma}{mg} = 1 + \frac{a}{g}.$$

4. Невесомость

Любое тело, свободно движущееся только под действием силы тяжести, находится в состоянии невесомости (рис.1.21).

Состояние, при котором сила действия тела на опору или подвес равна нулю, то есть когда теряется вес, называется невесомостью. $P = mg - ma = 0$.

1. Если тело движется с ускорением в горизонтальном направлении, изменится ли его вес?

2. Как изменится вес тела, если оно движется по вогнутой поверхности?

3. Как изменится вес космонавта при запуске ракеты-носителя, выводящей космический корабль на орбиту?

Каким будет вес пилота, летящего в самолёте и выполняющего «петлю Нестерова» в верхней точке этой траектории?

5. Изменяется ли масса тела вместе с изменением его веса?



Рис. 1.21

Образец решения задачи:

Чему будет равен вес груза с массой 100 kg:

а) при вертикальном подъёме вверх с ускорением 0,3 m/s^2;

б) при равномерном движении;

в) при спуске с ускорением 0,4 m/s^2;

г) при свободном падении?

g = 10 m/s^2.

Дано:	Формула:	Решение:
m = 100 kg a_1 = 0,3 m/s^2 a_2 = 0 m/s^2 a_3 = 0,4 m/s^2 a_4 = g g = 10 m/s^2	$P_1 = m\,(g + a_1)$ $P_2 = mg$ $P_3 = m(g - a_3)$ $P_4 = m\cdot(g - a_4)$	a) P_1 = 100 (10 + 0,3) N = 1030 N = 1,03 kN b) P_2 = 100·10 = 1000 N =1 kN d) P_3 = 100·(10 – 0,4) N = 100·9,6 = 960 = 0,96 kN e) P_4 = 100·(10 – 10) N = 0
P_1 = ? P_2 = ? P_3 = ? P_4 = ?		**Ответ:** P_1 = 1,03 kN, P_2 = 1 kN, P_3 = 0,96 kN, P_4 = 0.

Упражнение 4

1. Чему равна масса автомобиля (t), если он, пересекая выпуклый мост, имеет в самой верхней точке моста центростремительную силу 5000 N и давит на мост с силой 8000 N?

2. Найдите силу давления пилота на сидение в самой нижней точке траектории, если скорость самолёта, движущегося по «петле Нестерова», – 100 m/s, масса пилота – 70 kg, радиус окружности – 200 m.

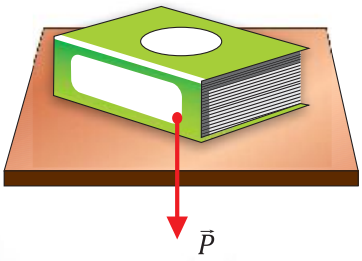
3. Найдите вес человека массой 60 kg в лифте, движущемся вертикально вниз равнозамедленно с ускорением 2 m/s^2.

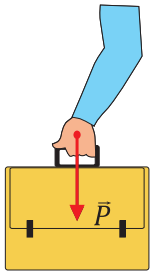
4. Какой вес будет иметь лыжник массой 65 kg со скоростью 2 m/s на самом глубоком участке вогнутой дороги с радиусом кривизны 20 m?

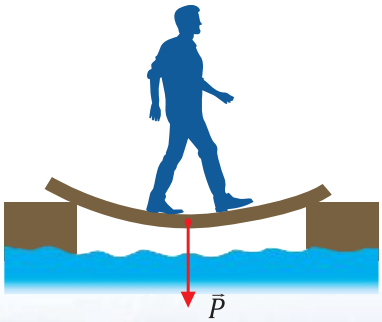
5. На сколько уменьшится вес автомобиля в самой верхней точке выпуклого моста с радиусом кривизны 100 m относительно веса этого же автомобиля в неподвижном состоянии? Масса автомобиля равна 2 t, а скорость движения равна 54 km/h.

Дополнительное задание

1. Как будет меняться вес тела в ситуациях на рисунке?







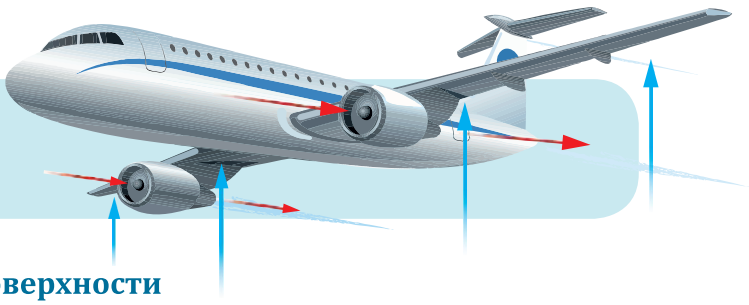
2. Объясните, в какой части данных мостов вес при движении увеличивается или уменьшается.



ДВИЖЕНИЕ ТЕЛА ПОД ДЕЙСТВИЕМ НЕСКОЛЬКИХ СИЛ

ТЕМА 6

1. Движение тела на горизонтальной поверхности.
2. Движение тел на неподвижном блоке.



Какие силы действуют на самолёт?

1. Движение тела на горизонтальной поверхности

Наблюдая за механическим движением тела, можно понять, что это движение происходит под действием не одной силы, а нескольких.

При движении тела, лежащего на горизонтальной поверхности под действием на него силы тяги, направленной вдоль поверхности, действуют следующие силы: сила тяги ($\vec{F}_t$), сила трения ($\vec{F}_{тр.}$), сила тяжести ($\vec{F}_{тяж}$), сила нормальной реакции опоры (N).

Чтобы переместить тело, сила тяги должна быть больше силы трения покоя:

$$F_т > \vec{F}_{тр.}$$

При этом тело начинает двигаться с места и продолжит своё движение с ускорением. Чтобы найти ускорение тела, необходимо определить равнодействующую силу (F) в направлении движения.

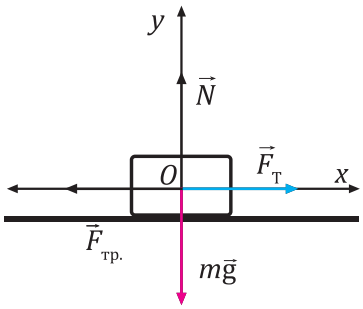


Рис. 1.22

Согласно рис. 1.22 $\vec{F} = \vec{F}_т + \vec{F}_{тр.}$. учитывая, что силы направлены в противоположные стороны:

$$\vec{F} = \vec{F}_т - \vec{F}_{тр.} \qquad (1)$$

здесь, поскольку N = mg, сила трения определяется выражением

$$\vec{F}_{тр.} = \mu N = \mu mg\,. \qquad (2).$$

Из второго закона Ньютона и формулы (2) получаем следующее выражение:

$$a = \frac{F_t - \mu mg}{m}\,. \qquad (3)$$

Для определения движения тела, находящегося на горизонтальной поверхности, при действии на него силы тяги, направленной под углом к горизонту, разложим эту силу на её составляющие. Для этого вдоль поверхности и в вертикальном направлении вводим координатные оси ОХ и ОУ (рис.1.23). Находим равнодействующую силу в направлении движения по поверхности:

$$F_x = F_{тх} - F_{тр.}$$

где $F_{тх}=F_т\cos\alpha$ составляющая силы тяги вдоль оси OX. При этом нормальная сила реакции поверхности за счет составляющей силы тяги на ось OY $F_{тх} = F_т\sin\alpha$ представляет собой:

$$N=mg - F_т\sin\alpha$$

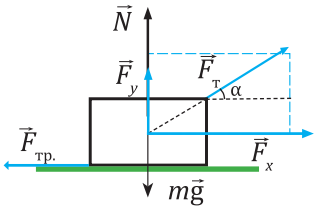


Рис. 1.23

Значит, сила трения:

$$F_{тр} = \mu N = \mu\,(mg - F_т\sin\alpha) \qquad (4)$$

Тогда равнодействующая сила по оси OX будет равна

$$F_x = F_т\cos\alpha - \mu\,(mg - F_т\sin\alpha). \qquad (5)$$

Используя $F_x = ma$ и выражение (5), находим ускорение тела:

$$a = \frac{F_т\cos\alpha - \mu\,(mg - F_т\sin\alpha)}{m}. \qquad (6)$$

2. Движение тел на неподвижном блоке

Тела массами m_1 и m_2 подвешивают на невесомом неподвижном блоке через нерастяжимую и невесомую нить, как показано на рис.1.24. Когда массы тел равны, они либо покоятся, либо движутся равномерно. При этом сила натяжения нити (T) будет равна весу (P) одного тела:

$$T = P.$$

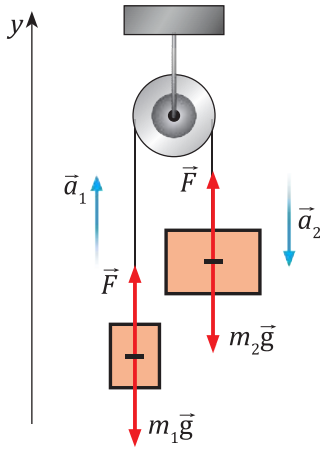


Рис. 1.24

Когда массы тел различны ($m_2>m_1$), второе тело движется с ускорением вниз, а первое тело движется с ускорением вверх. Для нахождения ускорения и силы натяжения тел определим направления действующих на них сил. На тела действует сила тяжести, направленная вниз, и сила натяжения нити, направленная вверх. Равнодействующие этих сил придают ускорение каждому телу. Поскольку нить не растягивается, ускорения тел равны по величине, а направления противоположны. Равнодействующая сила будет равна для первого тела:

$$F_1 = T - m_1 g\,,$$

а для второго тела

$$F_2 = m_2 g - T\,.$$

Из этих уравнений находим ускорение тел и силу натяжения нити:

$$\begin{cases} T = m_1\left(g + a\right) \\ T = m_2\left(g - a\right) \end{cases} \qquad (7)$$

$$a = \frac{m_2 - m_1}{m_1 + m_2}\,g\,; \qquad (8)$$

$$T = \frac{2m_1 m_2}{m_1 + m_2}\,g. \qquad (9)$$

1. Приведите примеры движения тела по горизонтальной поверхности под действием нескольких сил.

2. Какие величины у связанных тел, подвешенных на неподвижном блоке, будут иметь одинаковые значения?

3. На покоящееся тело действуют силы с четырёх сторон, и оно остается в равновесии. При каком условии тело может двигаться?

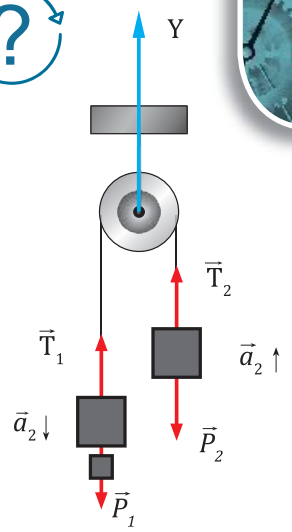


Рис. 1.25

Пример решения задачи:

Два груза с массами по 230 g соединены между собой невесомой веревкой и подвешены на неподвижном блоке. С каким ускорением они будут двигаться, если на один из грузов подвесить дополнительный груз в 30 g? Какую скорость набирают грузы через 0,5 s после начала движения? Какое расстояние за это время пройдет каждый груз? Трением пренебречь (рис.1.25).

Дано:	**Формула:**	**Решение:**
$m_1 = m_2 = 230$ g $= 0{,}23$ kg $m_3 = 30$ g $=$ $= 0{,}03$ kg $t = 0{,}5$ s; $v_0 = 0$	$T_1 = T_2 = T;$ $a_1 = a_2 = a;$ $\begin{cases} (m_1 + m_3)g - T = (m_1 + m_3)a \\ T - m_2 g = m_2 a \end{cases}$ $a = \dfrac{(m_1 + m_3)g - m_2 g}{(m_1 + m_3) + m_2}$ $v = v_0 + at = at$ $s = \dfrac{at^2}{2}$	$a = \dfrac{30 \cdot 10^{-3}\ \text{kg} \cdot 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{(230 \cdot 10^{-3}\ \text{kg} + 30 \cdot 10^{-3}\ \text{kg}) + 230 \cdot 10^{-3}\ \text{kg}} = 0{,}61\ \text{m/s}^2$ $v = 0{,}61\ \text{m/s}^2 \cdot 5\ \text{s} \approx 3{,}05\ \text{m/s};$ $S = \dfrac{at^2}{2} = \dfrac{0{,}61\ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 25\ \text{s}^2}{2} = 7{,}5\ \text{m}$
a= ?; v = ? s = ?		**Ответ:** $a = 0{,}61$ m/s^2, $v \approx 3{,}05$ m/s, $s = 7{,}5$ m.

Упражнение 5

1. Грузы массами 0,3 kg и 0,2 kg подвешены на шнуре, перекинутом через неподвижный блок. Найти ускорение грузов и силу натяжения шнура при их движении.

2. Грузы массами 95 g и 105 g подвешены на концах нити, перекинутой через неподвижный блок. Более тяжелый груз сначала подняли в верхнее положение, а затем отпустили. На сколько метров опустится тяжёлый груз от верхнего положения через 2 s? g = 9,81 m/s^2.

3. Два груза массами по m = 100 g подвешены к концам нити, перекинутой через неподвижный блок. На один из грузов помещен дополнительный груз m_0 = 50 g. С какой силой действует дополнительный груз на тело, на поверхности которого он лежит?

4. К концам нити, перекинутой через невесомый блок, подвешены 2 камня. Изначально их удерживают так, что более лёгкий камень находится на 2 m ниже более тяжёлого. Каково отношение масс камней, если они начнут движение под действием силы тяжести и через 2 s окажутся на одной высоте?

ТЕМА 7 РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ

Примеры решения задач

1. Чему равен вес ребёнка массой 50 kg в лифте, который движется вертикально вниз с ускорением 3 m/s²?

Дано:	Формула:	Решение:
m = 50 kg; a = 3 m/s² g = 10 m/s²	$P = m\,(g - a)$	P = 50 kg·(10 m/s² – 3 m/s²) = 350 N **Ответ:** P = 350 N.
P = ?		

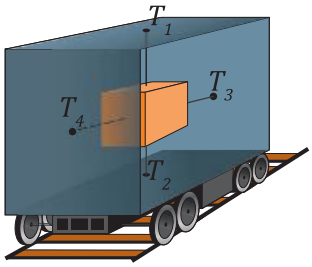


Рис. 1.26

2. . Тело прикреплено нитями к передней и задней стенкам, а также к потолку и полу вагона, движущегося с ускорением в направлении силы T_3, как показано на рисунке. Найти ускорение вагона, если сила натяжения нитей равна соответственно T_1 = 15 N, T_2 = 7 N, T_3 = 1,6 N и T_4 = 0,6 N (рис.1.26).

Дано:	Формула:	Решение:
T_1 = 15 N; T_2 = 7 N T_3 = 1,6 N; T_4 = 0,6 N g = 10 m/s²	$mg = T_1 - T_2$; $ma = T_3 - T_4$ $a = \dfrac{T_3 - T_4}{T_1 - T_2}g$	$a = \dfrac{1{,}6\text{ N} - 0{,}6\text{ N}}{15\text{ N} - 7\text{ N}} 10\text{ m/s}^2 = 1{,}25\text{ m/s}^2$ **Ответ:** a = 1,25 m/s².
a = ?		

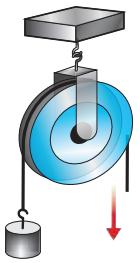


Рис. 1.27

3. Найти силу натяжения нерастяжимой нити и ускорение тела в устройстве, изображенном на рисунке. Масса тела m = 100 g, а сила тяги F = 1,2 N. Массу блока не учитывать. g = 10 m/s² (рис.1.27).

Дано:	Формула:	Решение:
m = 100 g = 0,1 kg F = 1,2 N g = 10 m/s² R = 100 m $\upsilon = 20\dfrac{m}{s}$	$\begin{cases} F = T \\ T - mg = ma \end{cases}$ $a = \dfrac{F - mg}{m} = \dfrac{F}{m} - g$	$F = T$ = 1,2 N $a = \dfrac{1{,}2\text{ N}}{0{,}1\text{ kg}} - 10\text{ m/s}^2 = 2\text{ m/s}^2$ **Ответ:** T = 1,2 N; a = 2 m/s².
T = ?; a = ?		

Упражнение 6

1. Найдите, груз какой массы на Луне может поднять человек, если на Земле он поднимает груз массой 50 kg. Ускорение свободного падения на Луне составляет 1,6 m/s^2, а на Земле – 9,8 m/s^2.

2. При какой скорости автомобиля при движении по центру вогнутого моста радиусом 100 m сила давления будет равна 25 kN? Масса автомобиля 2 t.

3. Найдите вес ребёнка массой 40 kg в положениях A и B, если R_1 =20 m, υ_1 = 10 m/s, R_2 = 10 m, υ_2 = 5 m/s. (рис.1.28).

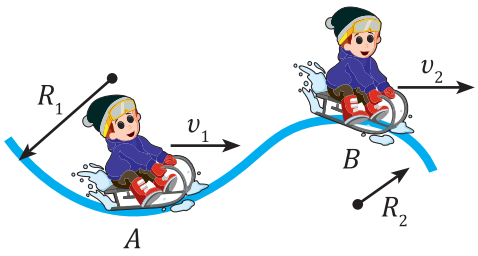


Рис. 1.28

4. Если нить перекинуть через неподвижный блок и на одном конце подвесить груз массой 15 N, а на другом – 25 N, с каким ускорением они будут двигаться (m/s^2)?

5. Два груза одинаковой массы подвешены к неподвижному блоку на веревке. При этом на груз слева добавляют дополнительный груз массой 3 m, а справа – массой m. Найдите ускорение движения системы.

6*. На неподвижный блок с помощью нити подвешены три одинаковых груза массой по 5 kg каждый. Найдите ускорение движения системы. Трением пренебречь (рис 1.29).

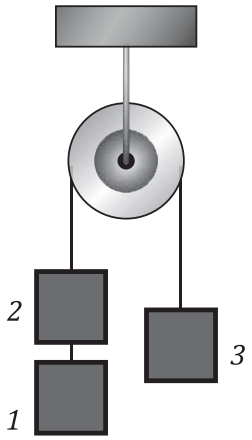


Рис. 1.29

7. Найдите скорость автомобиля (m/s), если его вес в нижней точке вогнутого моста с радиусом кривизны 9 m в 1,1 раза больше его веса на горизонтальной дороге.

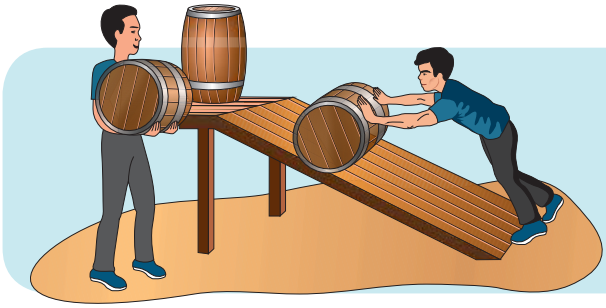
8. Автомобиль массой 5 t пересекает выпуклый мост со скоростью 21,6 km/h. С какой силой он действует на центр моста, если радиус кривизны моста 50 m?

9. Ребенок массой 50 kg катается на качелях, длина верёвки которых составляет 4 m. С какой силой он давит на сиденье при прохождении через положение равновесия со скоростью 6 m/s?



ТЕМА 8 ДВИЖЕНИЕ ТЕЛА НА НАКЛОННОЙ ПЛОСКОСТИ

1. Роль силы тяжести на наклонной плоскости.
2. Трение на наклонной плоскости.
3. Движение тела вниз по наклонной плоскости.
4. Подъём тела вверх по наклонной плоскости.



Кто из двух рабочих прилагает меньшую силу? Объясните почему.



В повседневной жизни тела не всегда движутся по горизонтальной поверхности, а иногда и по наклону. Такие наклоны мы называем наклонными плоскостями. Примером наклонной плоскости могут служить детские горки (рис.1.30), наклонные шоссе, погрузочные эстакады для грузовых автомобилей. Итак, на что следует обратить внимание при подъёме или спускании тел по наклонной плоскости? В чём будет заключаться важность наклонных плоскостей?



Рис. 1.30

Использование наклонных плоскостей позволяет нам уменьшить значение силы, необходимой для вертикального подъёма тела. На тело, которое находится в покое или движется на наклонной плоскости, действует несколько сил.

1. Составляющие силы тяжести, действующей на тело на наклонной плоскости

Как известно, сила тяжести всегда направлена вертикально вниз. Составляющая этой силы, направленная вниз по наклонной плоскости (F_x), находится в зависимости от угла наклона наклонной плоскости следующим образом:

$$F_x = mg\sin\alpha. \quad (1)$$

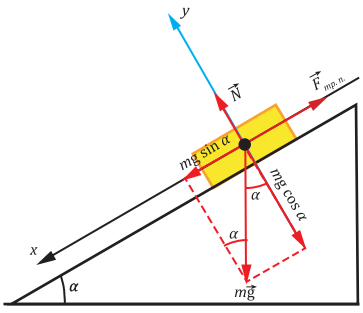


Рис. 1.31

Это сила представляет собой силу, которая тянет тело вниз по наклонной плоскости. Составляющая силы тяжести, перпендикулярная к наклонной плоскости, определяется по формуле:

$$F_y = mg\cos\alpha. \quad (2)$$

Эта сила равна нормальной силе реакции опоры (N), действующей на предмет со стороны поверхности. Согласно III закону Ньютона, нормальная сила реакции противоположна по направлению силе F_y, но равна ей по численному значению (рис. 1.31).

$$N = mg\cos\alpha. \quad (3)$$

Составляющие (проекции) силы тяжести и силы реакции опоры по осям ОХ и ОУ заставляют тело оставаться на наклонной плоскости в покое или двигаться с ускорением.

2. Сила трения на наклонной плоскости

На тело на наклонной плоскости всегда действует составляющая силы тяжести, направленная вниз по наклонной плоскости относительно оси OX. Какая сила уравновешивает составляющую силы тяжести на оси OX, если тело покоится на наклонной плоскости? Когда тело находится в покое, на него действует сила трения покоя ($F_{тр.п}$) (рис.1.31). Эта сила направлена вверх по наклонной плоскости и численно равна силе, скатывающей тело вниз (F_x):

$$F_{тр.п} = F_x = mg\sin\alpha. \quad (4)$$

Если тело скользит вверх или вниз по наклонной плоскости, то на тело действует сила трения скольжения ($F_{тр.с}$), которая выражается через нормальную силу реакции поверхности:

$$F_{тр.с} = \mu N = \mu mg\cos\alpha. \quad (5)$$

3. Движение тела вниз по наклонной плоскости

Когда на тело, лежащее на наклонной плоскости, не действуют другие тела, на него действует только сила тяжести, сила трения между поверхностью и телом и нормальная сила реакции поверхности. Равнодействующая этих сил, направленная вниз по наклону, равна (рис.1.32):

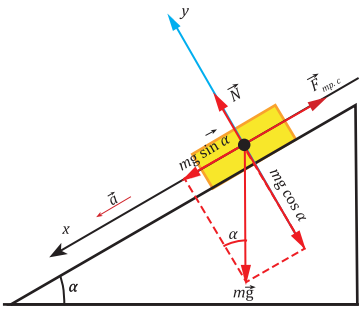


Рис. 1.32

$$F = F_x - F_{тр}$$

$$F = mg\sin\alpha - \mu mg\cos\alpha. \quad (6)$$

Здесь: F – равнодействующая сила, F_x – сила, тянущая тело вниз по наклонной плоскости, $F_{тр}$ – сила трения между телом и поверхностью наклонной плоскости.

Рассмотрим частные случаи формулы в зависимости от вида движения тела на наклонной плоскости:

1. Сила, скатывающая тело вниз по поверхности, меньше силы трения покоя: при $F_x < F_{тр.п}$ тело будет покоиться на наклонной плоскости. При этом выполняется соотношение $\mu > \operatorname{tg}\alpha$.

2. Когда $F_x = F_{тр}$, тело остается в покое на наклонной плоскости или движется вниз с постоянной скоростью. При этом выполняется соотношение $\mu = \operatorname{tg}\alpha$.

3. При $F_x > F_{тр.с}$ тело движется с ускорением вниз. При этом выполняется соотношение $\mu < \operatorname{tg}\alpha$.

Используя тот факт, что это равнодействующая сила равна $F = ma$:

$$ma = mg\sin\alpha - \mu mg\cos\alpha,$$

мы находим, что ускорение тела равно

$$a = g(\sin\alpha - \mu\cos\alpha). \quad (7)$$

4. Подъём тела вверх по наклонной плоскости

Чтобы поднять тело вверх по наклонной плоскости, нам нужно приложить к нему внешнюю силу ($F_{вн}$), направленную вверх по плоскости. При этом сила трения скольжения ($F_{тр.с}$) будет направлена вниз по плоскости. Равнодействующая по направлению движения тела вверх определяется следующим образом:



$$F = F_{вн} - (F_x + F_{тр}).$$

Если равнодействующая сила равна нулю:

$$F_{вн} = mg(\sin\alpha + \mu\cos\alpha),$$

тело покоится на наклонной плоскости или движется вверх по наклону с постоянной скоростью.

Если $F_{вн} > F_x + F_{тр}$, то тело движется вверх по наклону с ускорением.

Ускорение в этом случае определяется по формуле:

$$a = \frac{F_{вн}}{m} - g\left(\sin\alpha + \mu\cos\alpha\right). \qquad (8)$$

1. Как зависит движение предмета по наклонной плоскости от угла наклона?

2. Для каких целей можно использовать наклонную плоскость?

3. Когда тело находится в равновесии на наклонной плоскости, при каких условиях оно движется равномерно или ускоренно?

Пример решения задачи

Мальчик катается на лыжах по заснеженному склону. Угол наклонной плоскости относительно горизонта 30°, а коэффициент трения скольжения между лыжами и снегом равен 0,15. Суммарная масса ребёнка и лыж 65 kg. Определите ускорение ребёнка при спуске с наклонной плоскости.

Дано:	Формула:	Решение:
$\alpha = 30°$ $\mu = 0{,}15$ $m = 65$ kg $g = 9{,}8$ m/s^2 $a = ?$	$a = g\left(\sin\alpha - \mu\cos\alpha\right)$	$a = 9{,}8\ \text{m/s}^2\left(\frac{1}{2} - 0{,}15\cdot\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \approx 3{,}63\ \text{m/s}^2$ **Ответ:** $a \approx 3{,}63$ m/s^2.

Упражнение 7

1. Груз массой 26 kg лежит на наклонной плоскости длиной 13 m и высотой 5 m. Коэффициент трения между грузом и наклонной плоскостью равен 0,5. Какую силу надо приложить к грузу вдоль плоскости, чтобы втащить его вверх? А стащить вниз?

2. Общая масса саней и человека в них 100 kg. Эти сани скользят с горки высотой 8 m и длиной 100 m. Какова средняя сила сопротивления движению саней, если начальная скорость равна нулю, а скорость саней в конце горки достигает 10 m/s?

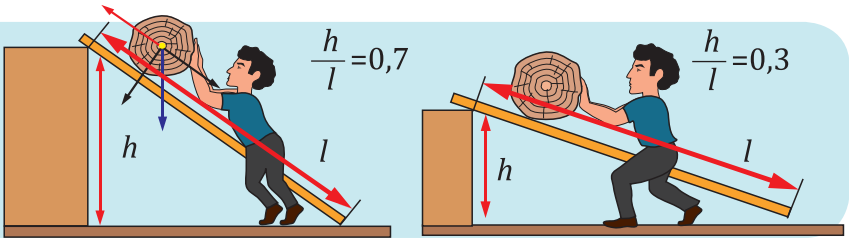
3. На плоскости с углом наклона 30° груз удерживается силой 6 N параллельно наклонной плоскости. Коэффициент трения равен 0,4. Найдите массу груза.

РАБОТА, СОВЕРШАЕМАЯ ПРИ ДВИЖЕНИИ ТЕЛА ПО НАКЛОННОЙ ПЛОСКОСТИ. КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ НАКЛОННОЙ ПЛОСКОСТИ

ТЕМА 9

1. Работа, совершаемая при перемещении тела по наклонной плоскости.
2. Коэффициент полезного действия наклонной плоскости.

Что означает отношение высоты к длине при изучении наклонной плоскости?



1. Работа, совершаемая при перемещении тела по наклонной плоскости

Предмет можно поднять на определённую высоту, подняв его в вертикальном направлении или с помощью наклонной плоскости. Почему мы часто используем наклонную плоскость? Потому что мы тратим меньше силы, используя наклонную плоскость. Какую работу мы совершаем в этих двух случаях?

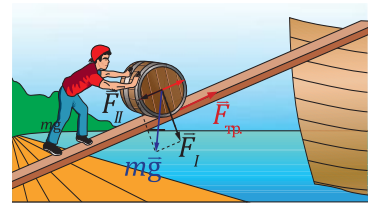
Мы совершаем работу против силы тяжести, когда поднимаем тело вертикально вверх. В этом случае совершаемая работа равна

$$A_1 = mgh.$$

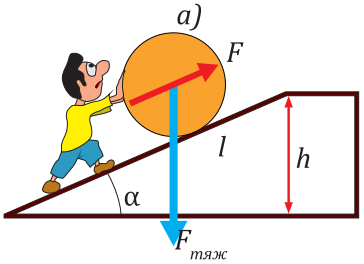
Поднимая тело вверх по наклонной плоскости, мы совершаем работу не только против силы тяжести, но и силы трения. В этом случае совершаемая работа определяется по формуле

$$A_2 = F_{тяж}h + F_{тр}l = mgh + \mu mgl\cos\alpha.$$

Значит, больше работы совершается при поднятии тела вверх по наклонной плоскости. Работа, совершаемая для преодоления силы трения, считается бесполезной (рис.1.33).



а)



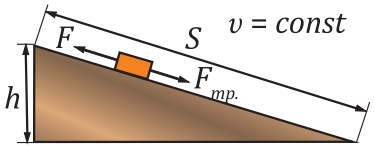
б)

2. Коэффициент полезного действия наклонной плоскости

В жизни и в технике мы используем наклонные плоскости разного наклона. Что следует учитывать при их выборе? Наклонные плоскости используются как вспомогательные механизмы при выполнении работ. Их коэффициент полезного действия (КПД) составляет менее 100%. КПД наклонной плоскости (η – этта) определяется отношением выполненной полезной работы ($A_п$) к затраченной работе ($A_з$). То есть:

$$\eta = \frac{A_п}{A_з} = \frac{mgh}{mgh + \mu \cdot mgl\cos\alpha} = \frac{1}{1 + \mu \cdot ctg\alpha} \cdot 100\%.$$

При этом $l = \frac{h}{\sin\alpha}$.



в)

Рис. 1.33



Значит, с увеличением угла наклона КПД наклонной плоскости увеличивается, а общая совершаемая работа уменьшается. Но увеличение угла наклона приводит к увеличению требуемой силы. Поэтому при выборе наклонной плоскости обращают внимание на то, что КПД имеет большее значение, а затрачиваемая сила – меньшее.

1. Объясните, почему увеличение угла наклона наклонной плоскости вызывает увеличение её полезной работы.

2. Изготовьте дома наклонную плоскость и объясните, для чего она нужна.

3. Какой наклонной плоскостью должен пользоваться ученик начальной школы при подъёме предмета по наклонной плоскости? А старшеклассник?

Пример решения задачи

Груз тянут вверх по наклонной плоскости, и прикреплённый к нему динамометр показывает 39,2 N. Найти силу трения, действующую на груз, и КПД наклонной плоскости, если вес груза – 117,6 N, длина наклонной плоскости – 1,8 m, а высота – 30 cm.

Дано:	Формула:	Решение:
F = 39,2 N P = 117,6 N l = 1,8 m h = 30 cm = 0,3m	$\eta = \frac{Ph}{Fl}100\%$ $F_{mp} = F - P\frac{h}{l}$	$F_{mp} = 39,2\text{ N} - 117,6\text{ N}\frac{0,3\text{ m}}{1,8\text{ m}} = 19,6\text{ N}$ $\eta = \frac{117,6 \cdot 0,3}{39,2 \cdot 1,8}100\% = 50\%$
F_{mp} = ? η = ?		**Ответ:** η = 50 %; $F_{тр}$=19,6 N.

Упражнение 8

1. При подъёме груза по наклонной плоскости с КПД 80% была совершена работа 20 J. Найти полезную работу.

2. Предмет был поднят по наклонной плоскости под действием силы 15 N. Найдите КПД наклонной плоскости, если вес тела 16 N, высота наклонной плоскости 5 m, длина 6,4 m.

3. Когда груз массой 15 kg тянут вниз по наклонной плоскости, динамометр, прикреплённый к грузу, показывает 40 N. Найдите КПД наклонной плоскости, если длина наклонной плоскости – 1,8 m, а высота – 30 cm.

4. Работа 800 J была совершена за 16 s при толкании саней в гору. Какая мощность (W) достигается при этом?

Примеры решения задач

1. Тело весом 1000 N движется вверх по наклонной плоскости, образующей с горизонтом угол 30°. Сила, действующая на тело, параллельная наклонной плоскости и направленная вверх, равна 800 N. (рис.1.34). Коэффициент трения равен 0,05. На какое расстояние перемещается тело за 2 s?

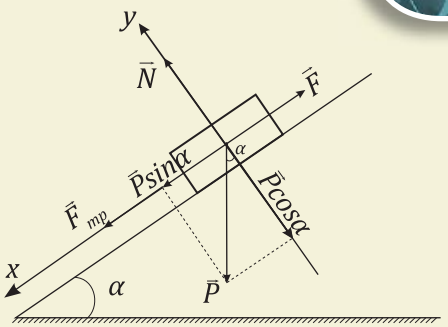


Рис. 1.34

Дано:	Формула:	Решение:
$P = 1000$ N $F_t = 800$ N $\mu = 0{,}05$ $t = 2$ s $\alpha = 30°$ $s = ?$	$F_t - F_{mp} - P\sin\alpha = ma$ $F_{mp} = \mu P\cos\alpha$ $F_t - \mu P\cos\alpha - P\sin\alpha = ma = \frac{P}{g}a$ $s = \frac{at^2}{2} = \left(\frac{F_t}{P} - \mu\cos\alpha - \sin\alpha\right)\cdot\frac{gt^2}{2}$	$s = \left(\frac{800\text{ N}}{1000\text{ N}} - 0{,}05\cdot\frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{1}{2}\right)\cdot\frac{9{,}8\ \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\cdot(2\text{s})^2}{2} \approx 5\text{ m}$ **Ответ:** $s = 5$ m.

2. Электропоезд массой $49\cdot10^5$ N, двигаясь по наклонной плоскости вверх, преодолел расстояние в 3 km за 5 минут. Наклон плоскости составляет 4 m на 1 km. Найти работу и мощность, выполняемые поездом, если коэффициент трения равен 0,002.

Дано:	Формула:	Решение:
$P = 49\cdot10^5$ N $s = 3$ km $= 3000$ m $h = 4$ m; $\mu = 0{,}002$ $l = 1$ km $= 1000$ m $t = 5$ min $= 300$ s $A = ?;\ N = ?$	$A = F\,s$ $F = P\cdot\sin\alpha + \mu\,P\cos\alpha$ $A = P(\sin\alpha + \mu\cos\alpha)s$ $N = \frac{A}{t}$ $\cos\alpha = \frac{\sqrt{l^2 - h^2}}{l}$; $\sin\alpha = \frac{h}{l}$	$\sin\alpha = \frac{4}{1000} = 0{,}004;\quad \cos\alpha = 0{,}9999 \approx 1$ $A = 49\cdot10^5\text{ N}\,(0{,}004 + 0{,}002\cdot1)\cdot3000 =$ $= 882\cdot10^5\text{ N}\cdot\text{m} = 88{,}2\text{ MJ}$ $N = \frac{88{,}2\cdot10^6\text{ J}}{300\text{ s}} = 294\cdot10^3\text{ W} = 294\text{ kW}$ **Ответ:** $A = 88{,}2$ MJ ; $N = 294$ kW.





Упражнение 9

1. В горизонтальной плоскости лежит тело массой 5 kg. Какой путь пройдёт тело за 1 s под действием силы 50 N, направленной под углом 60° к горизонту? Коэффициент трения между телом и плоскостью равен 0,2.

2. Телу, находящемуся на наклонной плоскости с углом наклона 10°, сообщили начальную скорость 10 m/s. Найти путь и время движения тела до момента его остановки, если коэффициент трения между телом и плоскими поверхностями равен 0,5. $\sin 10° \approx 0{,}17$; $\cos 10° \approx 0{,}98$.

3. Какое ускорение может получить автомобиль, движущийся по наклонной дороге с углом наклона 20°, если коэффициент трения колёс с дорожным покрытием равен 0,5? Сколько проедет автомобиль за 10 s, если скорость в начале подъёма равна 10 m/s?

4. Какой должна быть мощность трактора, чтобы он смог тянуть прицеп массой 5 t вверх по наклону со скоростью 1 m/s, если угол наклона равен 20°, а коэффициент трения равен 0,2?

5. По наклонной плоскости длиной 4 m и высотой 0,8 m был поднят груз весом 2205 N. Найти КПД наклонной плоскости, если сила трения равна 220,5 N?

6. Когда угол наклона наклонной плоскости был равен α_0, лежащее на ней тело начало равномерно скользить. Найти коэффициент трения между телом и наклонной плоскостью.

7. Найти КПД наклонной плоскости длиной 1 m, высотой 0,6 m. Коэффициент трения скольжения при движении равен 0,1.

8*. Какую работу совершают двигатели электропоезда, если масса электропоезда $1{,}2 \cdot 10^5$ kg, коэффициент трения равен 0,05, при подъёме на расстояние 100 m с ускорением 1,5 m/s^2 вверх по наклону с углом $\alpha = 10^o$?

9. Какую работу необходимо совершить, чтобы втащить груз массой 400 kg на высоту 2 m по наклонной плоскости с углом наклона 30°, и коэффициентом трения, равным 0,3? Чему равен КПД наклонной плоскости?



ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КПД НАКЛОННОЙ ПЛОСКОСТИ

Цель работы: изучить наклонную плоскость и цель её использования. Закрепить знания о полезной и полной работе, совершаемой при подъёме тела по наклонной плоскости, а также знания о коэффициенте полезного действия наклонной плоскости. Формирование умения считать погрешности.

Необходимые инструменты и материалы: длинная тонкая доска, штатив с зажимами, деревянный брусок, линейка, набор грузов, динамометр (рис.1.35).

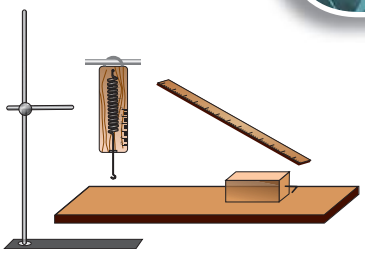


Рис. 1.35

Порядок выполнения работы

1. Тонкая доска крепится к штативу. Затем длина наклонной плоскости (l) и высота (h) измеряются линейкой (рис.1.36).

2. С помощью динамометра определяют вес P деревянного бруска (рис. 1.37).

3. Поставив брусок на наклонную плоскость, тянут его с помощью динамометра равномерно (без рывков) с силой F вдоль наклонной плоскости (рис.1.38).

4. По формуле $A_з = Fl$ вычисляется затраченная (полная) работа, а по формуле $A_п = Ph$ вычисляется полезная работа.

5. С помощью выражения $\eta = \frac{A_п}{A_з} \cdot 100\%$ вычисляется коэффициент полезного действия наклонной плоскости.

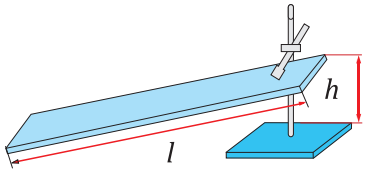


Рис. 1.36

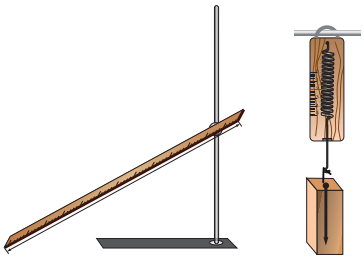


Рис. 1.37

Эксперимент повторяется не менее трёх раз, результаты записываются в таблицу.

№	l, m	h, m	F, N	P, N	$A_з$, J	$A_п$, J	η, %
1							
2							
3							

Проводя опыт для различных высот наклонной плоскости, делают выводы о зависимости коэффициента полезного действия от угла наклона наклонной плоскости.

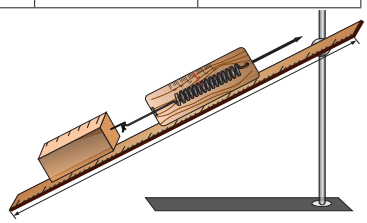


Рис. 1.38

Домашнее задание

Вы можете попробовать провести вышеописанный эксперимент с использованием пружинных весов в домашних условиях.

1. Что за устройство наклонная плоскость и для чего она используется?

2. Как определяется полезная и затраченная (полная) работа, совершаемая при подъёме тела по наклонной плоскости?

3. В чём причина того, что полезная работа меньше полной работы?

4. Как вы объясните, что коэффициент полезного действия наклонной плоскости зависит от угла её наклона?

5. Можно ли определить ускорение свободного падения с помощью неподвижного блока?

ТЕМА 12

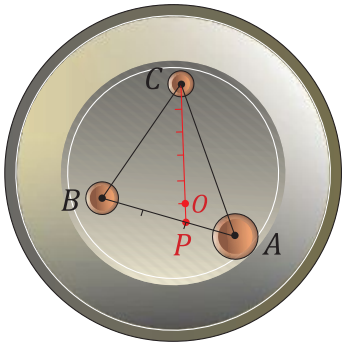
ЦЕНТР МАСС. ВИДЫ РАВНОВЕСИЯ. МОМЕНТ СИЛЫ

1. Центр масс и методы их определения.
2. Виды равновесия.
3. Момент силы.
4. Применение рычагов в быту и технике.



Почему диаметр рулевого колеса грузовых автомобилей больше, чем у легковых автомобилей?

1. Центр масс и методы их определения



При строительстве зданий и мостов, при разработке различных механизмов важно, чтобы они находились в равновесном состоянии. Как добиться того, чтобы тела находились в равновесии? При перемещении предметов, выборе места для укладки брусьев домов и выполнении подобных работ необходимо обращать внимание на равновесие. Равновесие тел зависит от положения их центра масс. Центр масс – это точка, определяемая относительно тела или системы тел. Центры масс тел совпадают с их центрами тяжести (рис.1.39).

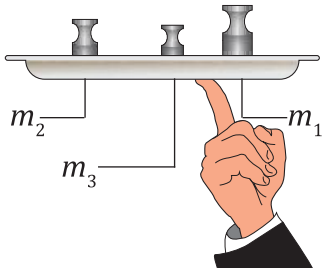


Рис. 1.39

Равнодействующая сил тяжести, действующая на все части тела, лежит на прямой, проходящей через центр тяжести тела. Следовательно, сила тяжести приходится на ***центр тяжести*** тела.

Центр масс – это точка, в которой как бы сосредоточены массы всех частей тела или системы тел, и эта точка называется центром масс тела или системы тел.

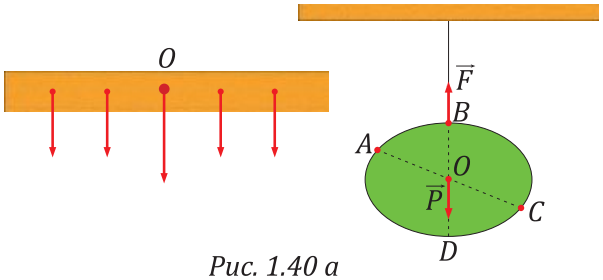


Рис. 1.40 а

На рисунке 1.40 *а* изображена точка O (центр тяжести), к которой приложены параллельные силы тяжести, действующие на отдельные участки однородного (т. е. изготовленного из одного и того же вещества, одинакового по всей длине поперечного сечения, равномерно распределённого по плотности) металлического стержня, и равнодействующая сила.

Центры масс однородных тел, имеющих некоторую правильную геометрическую форму (сферу, цилиндр, прямую призму), совпадают с их геометрическими центрами (рис.1.40 *б*). Если тело не однородно или не имеет центра симметрии и является плоским, его центр тяжести можно определить опытным путём. Для этого тело подвешивают попеременно за две точки, и из этих точек проводят вертикальные линии силы тяжести (рис. 1.41). Точка пересечения этих линий будет центром тяжести плоского тела.

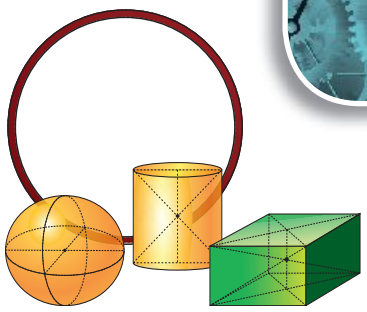


Рис. 1.40 б

2. Виды равновесия тел

После того, как центры масс тел определены, их легко привести в состояние равновесия или сдвинуть с места.

Обычно равновесие бывает трёх типов:
– устойчивое равновесие;
– неустойчивое равновесие;
– безразличное равновесие.

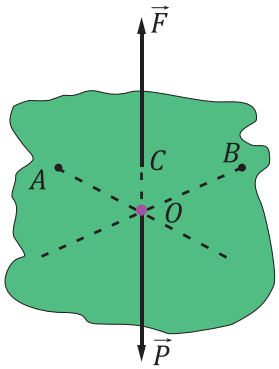


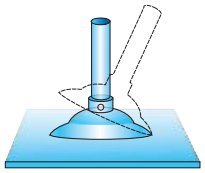
Рис. 1.41

Если после выведения тела из состояния равновесия возникает сила, возвращающая его в исходное положение, то такое равновесие тела называется устойчивым равновесием. (рис. 1.42 *а*).

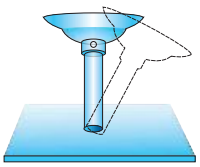
Если после выведения тела из состояния равновесия возникает сила, отталкивающая его ещё дальше от исходного положения равновесия, то такое равновесие тела называется ***неустойчивым равновесием*** (рис.1.42 *б*).

Если после выведения тела из состояния равновесия не возникает силы, изменяющей его положение, то такое равновесие тела называется **безразличным равновесием** (рис.1.42 *в*).

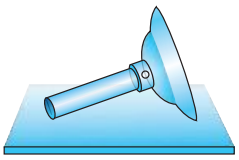
Если на плоскости находится тело, и эту плоскость поднимать за один конец вместе с телом, то тело опрокидывается. При этом вертикальная прямая, проведённая от центра тяжести тела, выходит за контур, образованный линиями, соединяющими точки опоры, и тело падает.



а)



б)



в)

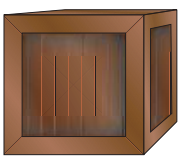


Рис. 1.42

3. Момент силы

Движение тел, имеющих ось вращения, будет зависеть не только от величины приложенной к нему силы, но и от её направления. Кратчайшее расстояние от оси вращения до линии действия силы называется **плечом силы**. При этом плечо силы всегда перпендикулярно направлению силы.

Произведение силы, приложенной к телу с осью вращения, и плеча силы называется моментом силы. Момент силы обозначается буквой *M*.

$$M = F \cdot l. \qquad (1)$$

Единица измерения момента силы в СИ [M] = $N \cdot m$.

Давайте рассмотрим однородный стержень и установим его центр тяжести (точка О) на опоре, чтобы этот стержень мог свободно вращаться вокруг опоры. При этом стержень приходит в горизонтальное положение равновесия. Если мы повесим на правую сторону рычага один груз на расстоянии четырех единиц (точка А), а на другую сторону повесим второй такой же груз на расстоянии двух единиц (точка В), его равновесие нарушится. Для того чтобы стержень пришёл в исходное равновесие, в точку В необходимо повесить ещё один точно такой же груз (рис.1.43). Следовательно, чем меньше плечо силы на рычаге, на котором установлены силы, тем больше должна быть приложенная сила, чтобы рычаг находился в равновесии. Из этого можно сделать вывод, что между силами и плечами сил будет выполняться следующее соотношение:

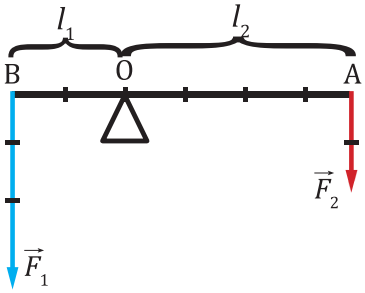


Рис. 1.43

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{l_2}{l_1} \qquad F_1 \cdot l_1 = F_2 \cdot l_1$$

$$M_1 = M_2 . \qquad (2)$$

l_1 – длина отрезка ОА, является плечом силы F_1. l_2 – длина отрезка ОВ, являющегося плечом силы F_2.

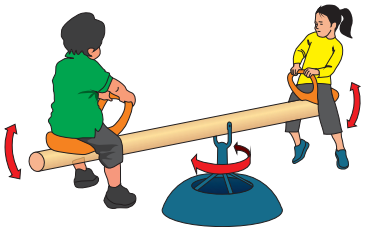
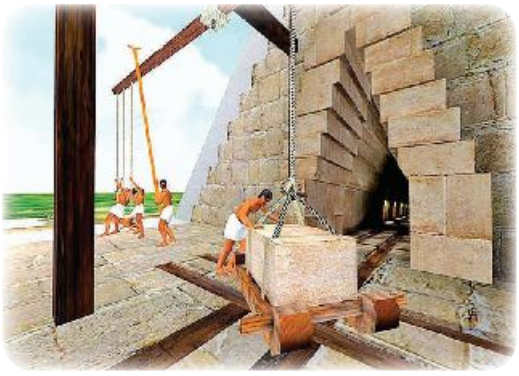


Рис. 1.44

Равенство (2), найденное Архимедом, ***называется условием равновесия рычага***. В наблюдаемом эксперименте момент силы M_1 пытается повернуть рычаг по часовой стрелке, тогда как момент силы M_2 пытается повернуть его против часовой стрелки. Простейшим устройством, способным вращаться вокруг неподвижной опоры, являются детские качели. (рис.1.44).

4. Применение рычагов в быту и технике

По принципу рычагов работают различные виды ножниц, гвоздодёров. Рычажные весы – это также рычаг, плечи которого равны. Если плечи весов брать разной длины, то можно будет измерять тела большей массы с помощью грузов малой массы. В строении тела человека и животных также присутствуют части, работающие по принципу рычага. Кости рук и ног вместе с мышцами образуют рычаг (рис.1.45).



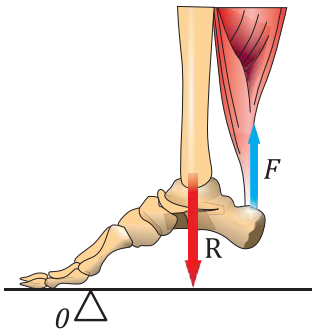




Рис. 1.45



1. *Почему центр масс и центр тяжести тела совпадают?*

2. *Как действует на тело сила, направление действия которой проходит через центр масс? А если не проходит?*

3. *Как будет действовать тело, если направление силы, действующей на тело, не проходит через центр масс?*

Пример решения задачи

Длинное плечо рычага равно 6 m, а короткое – 2 m. К длинному плечу приложена сила 500 N. Какой массой груз можно поднять его коротким плечом (рис. 1.46)?

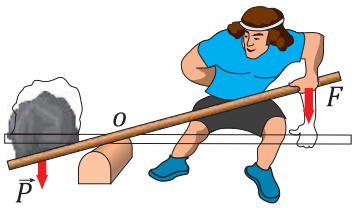


Рис. 1.46

Дано:	Формула:	Решение:
$l_1 = 6$ m $l_2 = 2$ m $F_1 = 500$ N	$M_1 = M_2$ $F_1 \cdot l_1 = F_2 \cdot l_2$ $F_2 = mg$ $m = \frac{F_1 l_1}{g l_2}$;	$m = \frac{500\ \text{N} \cdot 6\ \text{m}}{9{,}8\ \text{m/s}^2 \cdot 2\ \text{m}} \approx 153\ \text{kg}$
m = ?		**Ответ:** $m \approx 153$ kg.

Упражнение 10

1. Короткое плечо рычага имеет длину 2,5 cm, а большое – 45 cm. К концу длинного плеча прикладывается сила 20 Н. Какое усилие нужно приложить к концу короткого плеча, чтобы рычаг находился в равновесии?

2. Камень массой 240 kg поднимается с помощью рычага. Какое усилие нужно приложить к длинному плечу длиной 2,4 m, если короткое плечо равно 0,6 m?

3. Как меняется совершаемая работа, если длину рычага увеличить в 2 раза?

4. Короткое плечо рычага имеет длину 4 cm, а большое – 50 cm. К концу длинного плеча прикладывается сила 40 N. Какую силу нужно приложить к короткому плечу, чтобы рычаг находился в равновесии?

5. На концы стержня массой 10 kg и длиной 40 cm подвешиваются грузы массой 40 kg и 10 kg. На каком расстоянии от одного конца нужно поставить опору, чтобы стержень находился в равновесии?

ТЕМА 13

ПРОСТЫЕ МЕХАНИЗМЫ, РАБОТАЮЩИЕ ПО ПРАВИЛУ МОМЕНТОВ.



1. Пара сил.
2. Рычаг.
3. Блок и винт.
4. Ворот (лебёдка) и клин.

Чтобы дверь не захлопывалась, иногда на пол кладут камень или кирпич, вбивая его в щель дверного проема. Приведёт ли это к поломке двери? Объясните свой ответ.

1. Пара сил

С древних времён и до наших дней человек ищет способы облегчить свой труд. В строительстве использовались различные механические приспособления для подъёма тяжелых колонн, обработанных мраморных камней. Три тысячи лет назад в Древнем Египте при строительстве пирамид тяжёлые каменные плиты перемещали с одного места на другое с помощью рычагов и поднимали на довольно большую высоту. Во многих случаях вместо того, чтобы поднимать тяжелый груз на какую-либо высоту, его перемещали или перетаскивали по наклонной плоскости. При строительстве минаретов, медресе, дворцов и мечетей в Самарканде и Бухаре грузы поднимали с помощью блоков, воротов.

В быту деревообрабатывающие станки, подъёмный кран при перемещении грузов, землеройно-выравнивающие тракторы также выполняют работу на основе простых механизмов.

Тело, имеющее ось вращения, приводится в движение под действием момента силы. При этом момент силы, действующей на тело, будет аналогичен действию пары сил.

Две равные и параллельные силы, направленные в противоположные стороны и не лежащие на одной прямой, называются парой сил.

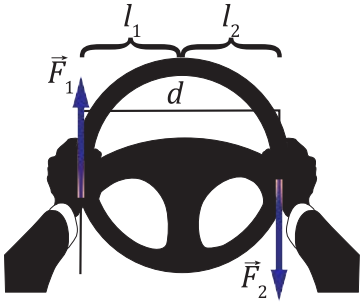


Рис. 1.47

В качестве примера можно привести поворот рулевого колеса автомобиля (рис.1.47).

Ось вращения находится в центре руля, на неё действует пара сил F_1 и F_2.

Если на тело с осью вращения действует несколько сил, то результирующий момент находят путём взаимного сложения моментов этих сил. При этом моменты силы, вращающей тело по часовой стрелке, имеют положительный знак, а моменты силы, вращающей тело против часовой стрелки, – отрицательный знак.

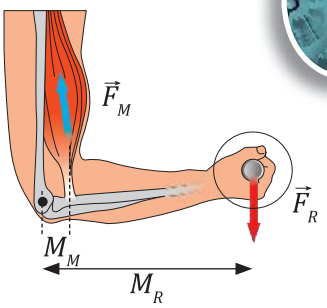
Чтобы найти результирующий момент силы, сложим их с учётом знаков моментов сил, действующих на тело:

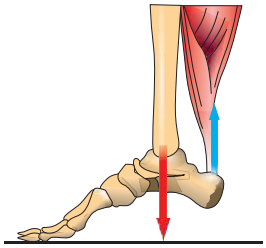
$$M = F_2 l_2 + (-F_1 l_1) = F_2 l_2 - F_1 l_1. \quad (1)$$

Если сумма моментов сил, поворачивающих тело с осью вращения в одну сторону, равна сумме моментов сил, поворачивающих тело в противоположную сторону, то равнодействующий момент всех сил равен нулю , а тело находится в равновесии:

$$M_1 + M_2 + \ldots + M_n = 0. \quad (2)$$

Это правило было найдено Архимедом и называется ***правилом моментов***. К простым механизмам, работающим по правилу моментов, относятся: рычаг, неподвижные и подвижные блоки, ворот, винт (домкрат) и другие простые механизмы.





2. Рычаг

На практике используются различные формы рычага (рис.1.48).

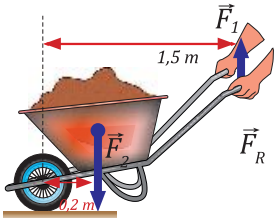


Рис. 1.48

3. Блок и винт

В быту и технике используется система подвижных и неподвижных блоков. В системе блоки соединяются между собой, образуя многоуровневые полиспасты. На рисунке 1.49 *а* изображены полиспасты с одним подвижным блоком, на рисунке 1.49 *б* – с одним неподвижным и одним подвижным блоком, на рисунке 1.49 *в* – с двумя подвижными и одним неподвижным блоком. Вес груза, подвешенного на многоуровневом полиспасте, распределяется на канатах, перекинутых через блоки.

Сила, приложенная к полиспасту при отсутствии трения в блоках, находится по формуле:

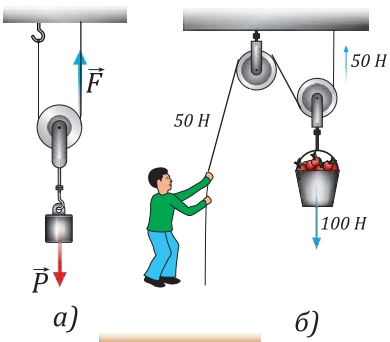
$$F = \frac{mg}{2^n} \quad (3)$$

Здесь n – число подвижных блоков в полиспасте.

При наличии трения в блоках часть приложенной силы расходуется на преодоление сил трения.

КПД полиспаста при трении находится по формуле:

$$\eta = \frac{mg}{2^n F}. \quad (4)$$



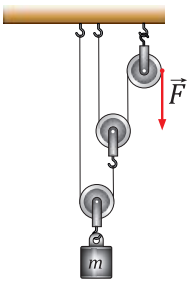
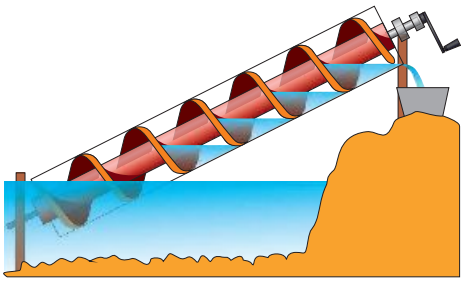


Рис. 1.49

Винт (рис. 1.50).





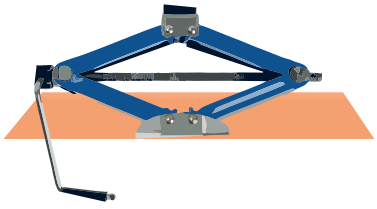
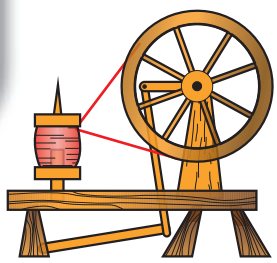


Рис. 1.50



4. Ворот (лебёдка) и клин

Сколько раз ворот даёт выигрыш по силе, можно найти по формуле

$$n = \frac{R}{r}. \qquad (5).$$

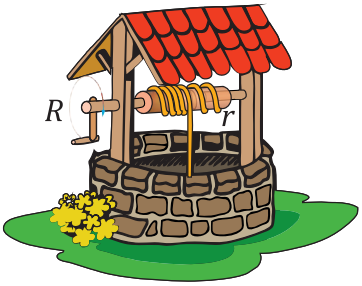
Сколько раз лебедка даёт выигрыш по силе, можно найти по формуле

$$n = \frac{R_1}{r_1}\frac{R_2}{r_2}. \qquad (6)$$



Здесь: R – радиус, который рисует ручка, вращающая барабан, r – радиус барабана (рис.1.51).

Клин



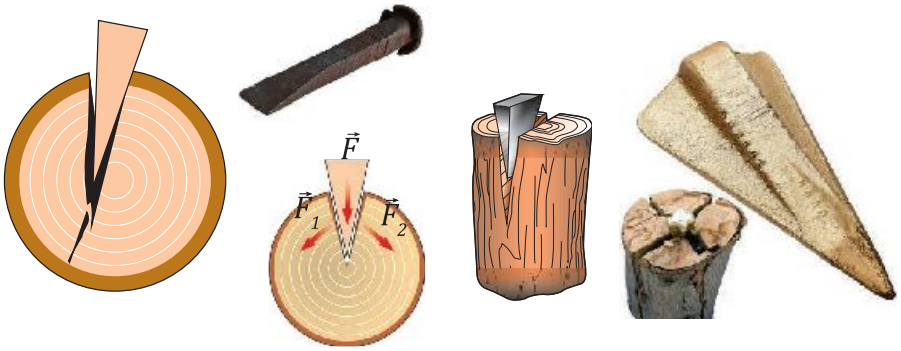


Рис. 1.51

?

1. Чем ворот похож на рычаг?

2. Почему по пологой лестнице подниматься легче, чем по крутой?

3. Почему человек, несущий тяжёлый груз (например, рюкзак), слегка наклоняется вперёд?

4. Где ещё вы видели использование простых механизмов?





РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ

ТЕМА 14

Примеры решения задач

1. В точке А изображённого на рисунке рычага висит груз массой 200 g. Какую силу покажет динамометр, подвешенный к точке Б, если рычаг находится в равновесии? Принять АО = 5 cm, ОБ = 2 cm (рис.1.52).

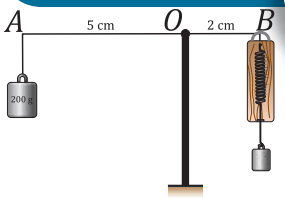


Рисунок 1.52

Дано:	Формула:	Решение:
m = 200 g =0,2 kg l_1 = 5 cm = 0,05 m l_2 = 2 cm = 0,02 m	$\frac{F_1}{F_2} = \frac{l_2}{l_1}$; $F_1 = mg$ $\frac{mg}{F_2} = \frac{l_2}{l_1}$	$F_2 = \frac{0,05\ \text{m} \cdot 0,2\ \text{kg} \cdot 10\ \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{0,02\ \text{m}} = 5\ \text{N}$
F_2 = ?	$F_2 = \frac{l_1 mg}{l_2}$	**Ответ:** F_2 = 5 N.

2. К какой точке нужно подвесить груз массой 10 kg, чтобы блок, изображенный на рисунке, был в равновесии (рис. 1.53)?

Дано:	Формула:	Решение:
m_1=4 kg m_2=10 kg l_0 = 5 m; l_1= 5 m l_2 = 4 m; l_3 = 3 m l_4 = 2 m; l_5 = 1 m	$M_1 = M_2$ $\frac{F_1}{F_2} = \frac{l_2}{l_1}$; $\frac{m_1 g}{m_2 g} = \frac{l_2}{l_1}$ $l_x = \frac{m_1 l_0}{m_2}$	$l_x = \frac{4 \cdot 5}{10} = 2$ m **Ответ:** Груз массой 10 kg нужно подвесить к точке l_4.
l_x = ?		

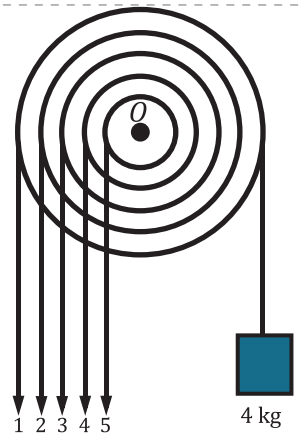


Рис. 1.53

3. Какую силу (N) надо приложить к концу верёвки в точке А, чтобы равномерно поднять груз весом P = 400 N?

Дано:	Формула:	Решение:
P = 400 N	$F = \frac{mg}{2^n}$	$F_1 = \frac{mg}{2} = \frac{P}{2} = \frac{400}{2} = 200\,N$ $F_2 = \frac{mg}{2} = \frac{P}{2} = \frac{200}{2} = 100\,N$ $F_3 = \frac{mg}{2} = \frac{P}{2} = \frac{100}{2} = 50\,N$
F_2 = ?		**Ответ:** F_3 = 50 N.

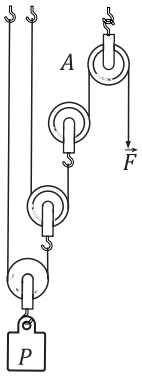


Рис. 1.54

Упражнение 11

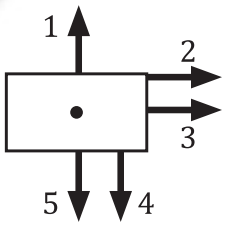


Рис. 1.55

1. Какие из сил, изображённых на рисунке 1.55, заставляют тело двигаться поступательно? (O – центр масс).

2. Короткое плечо рычага имеет длину 5 cm, а длинное – 30 cm. На короткое плечо действует сила 12 N. Какая сила должна быть приложена к его длинному плечу, чтобы привести рычаг в равновесие?

3. Сколько kg груза нужно добавить на правую сторону весов, показанных на рисунке 1.56, с неравными плечами, чтобы они находились в равновесии?

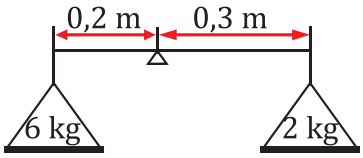


Рис. 1.56

4. На короткое плечо рычага действует сила 300 N, на длинное – 20 N. Длина короткого плеча – 5 cm. Определите длину длинного плеча.

5. На тело (рис. 1.57), ось вращения которого проходит через точку *O*, в определённом направлении прикладывается сила *F*. Какой из отрезков, изображённых на рисунке, будет плечом силы *F*?

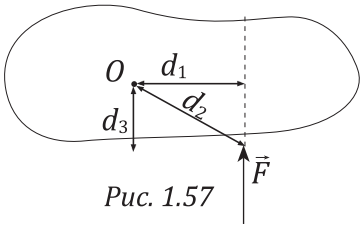


Рис. 1.57

6. Грузы массой 200 g и 600 g подвесили на края невесомого рычага длиной 80 cm. На каком расстоянии от большего груза следует поставить опору, чтобы рычаг находился в равновесии?

7*. С помощью домкрата необходимо поднять автомобиль массой 1500 kg. Шаг винта, который используется при этом, составляет 4 cm. Найдите силу, с помощью которой можно повернуть домкрат, если длина поворотного стержня составляет 0,5 m.

ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАДАНИЯ



1. Грузовики при разгрузке поднимали кузов под углом α. Но груз не соскальзывал вниз.

а) почему груз не скользил?

б) при каких условиях груз начнёт движение?



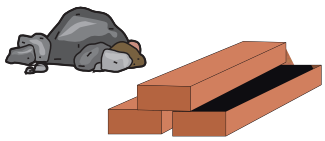
2. При строительстве грунт поднимают ведром. Когда рабочий с ускорением поднимал ведро вверх, нижняя часть ведра оторвалась.

а) объясните причину этого явления.

б) какую рекомендацию вы дадите работнику, чтобы ведро не вышло из строя?



3. Обид с Бунёдом отправился в путешествие на автомобиле. Баллон автомобиля был проколот, когда он достиг половины пути. Но оказалось, что у автомобиля нет домкрата для замены баллона. Они продолжили свой путь в той же ситуации, заменив баллон автомобиля, используя тела, показанные на рисунке. Как они это сделали? Ответ обоснуйте.





ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ ПО ГЛАВЕ I

1. Может ли равнодействующая двух сил 10 N и 14 N, приложенных к одной точке, быть равной 2, 4, 10, 24 N?

2. На какой высоте ускорение свободного падения составляет 25% от ускорения свободного падения на поверхности Земли?

3. На концы рычага действуют силы 2 и 18 N. Длина рычага 1 m. Где находится точка опоры, если рычаг находится в равновесии?



4. Радиус Луны – 1700 km, ускорение свободного падения объекта на ней – 1,6 m/s^2. Вычислите первую космическую скорость для Луны.

5. Скоростной лифт спускается с ускорением 5 m/s^2 относительно Земли. В какой-то момент времени с потолка лифта упал болт. Высота лифта 2,5 m. Определите время падения болта.

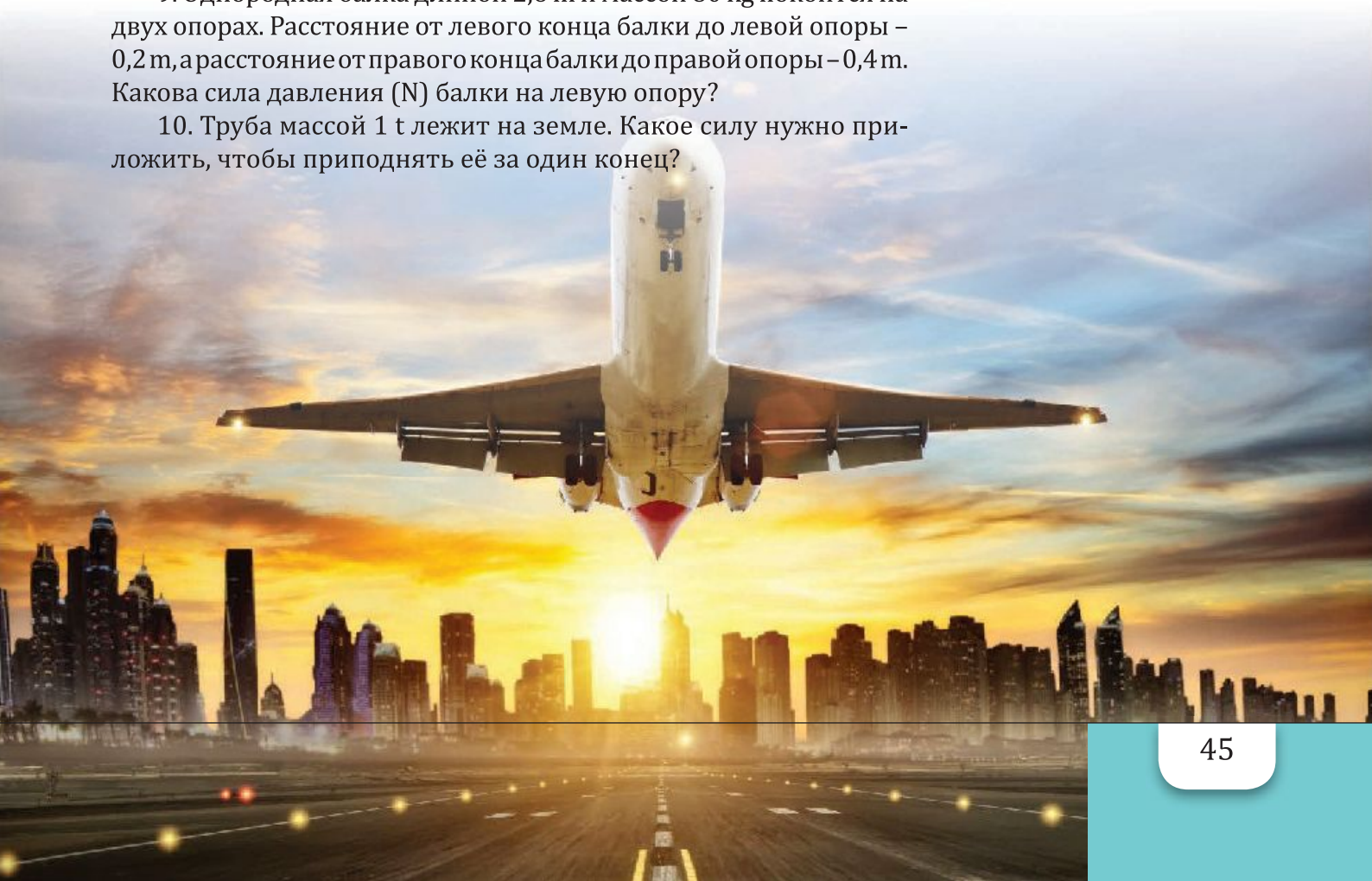
6. Как выражается составляющая силы тяжести, которая заставляет тело скользить вниз по наклонной плоскости, образующей угол α с горизонтом?

7. Объект скользит по наклонной плоскости. При каком значении коэффициента трения μ тело движется равномерно: 1) $\mu > \mathrm{tg}\alpha$; 2) $\mu < \mathrm{tg}\alpha$; 3) $\mu = \mathrm{tg}\alpha$?

8. Поднимающийся самолёт достигает скорости 360 km/h на высоте 5 km. Во сколько раз работа, совершаемая против силы тяжести при взлёте, больше работы, совершаемой для увеличения скорости самолёта?

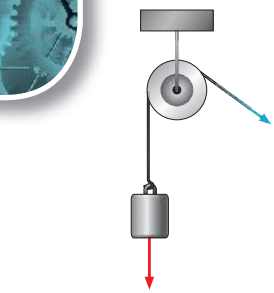
9. Однородная балка длиной 2,6 m и массой 80 kg покоится на двух опорах. Расстояние от левого конца балки до левой опоры – 0,2 m, а расстояние от правого конца балки до правой опоры – 0,4 m. Какова сила давления (N) балки на левую опору?

10. Труба массой 1 t лежит на земле. Какое силу нужно приложить, чтобы приподнять её за один конец?



ПРОЕКТНАЯ РАБОТА

Изготовление простых механизмов.



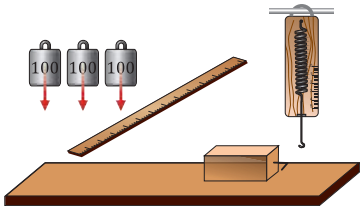


Рис. 1.58

Цель работы: научиться строить наклонную плоскость и пользоваться ею.

Необходимые инструменты и материалы: длинная доска толщиной 3–5 cm, деревянный брусок, линейка, набор грузов, динамометр, блок, верёвка (рис. 1.58).

Порядок выполнения работы

1. Длинную доску разрежьте на куски длиной 30, 40 и 50 cm (размеры можно выбирать произвольно).

2. Соберите из нарезанных частей прямоугольный треугольник, как показано на рис. 1.59.

3. Поместите неподвижный блок на конец вертикальной стороны собранного прямоугольного треугольника.

4. Соедините деревянный брусок и ведро верёвкой, протянув её через блок (рис. 1.60).

5. Положите один за другим грузы в ведро так, чтобы деревянный брусок стал скользить по наклонной плоскости под действием веса грузов.

6. Сделайте вывод по результатам проделанной работы.

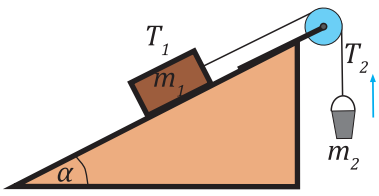


Рис. 1.60

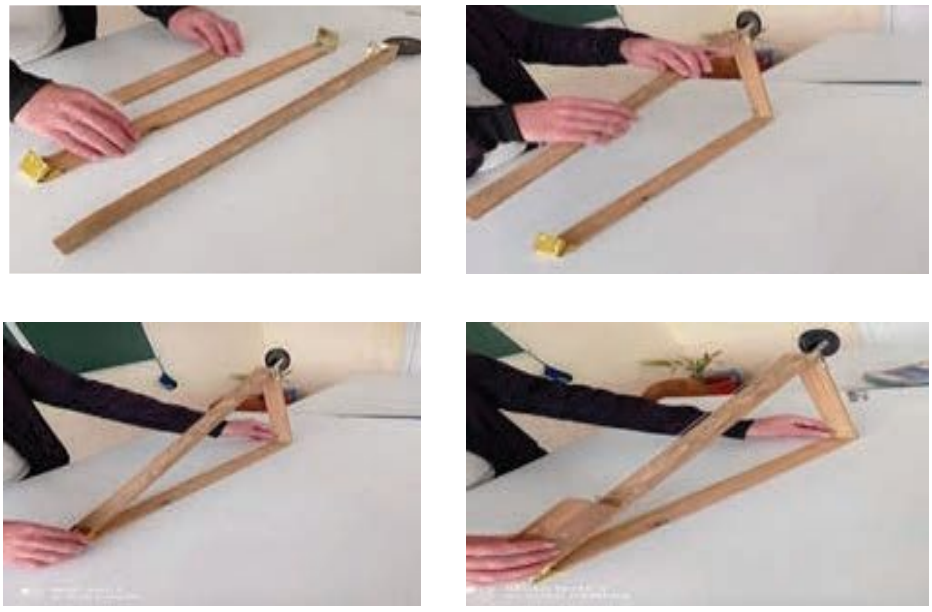
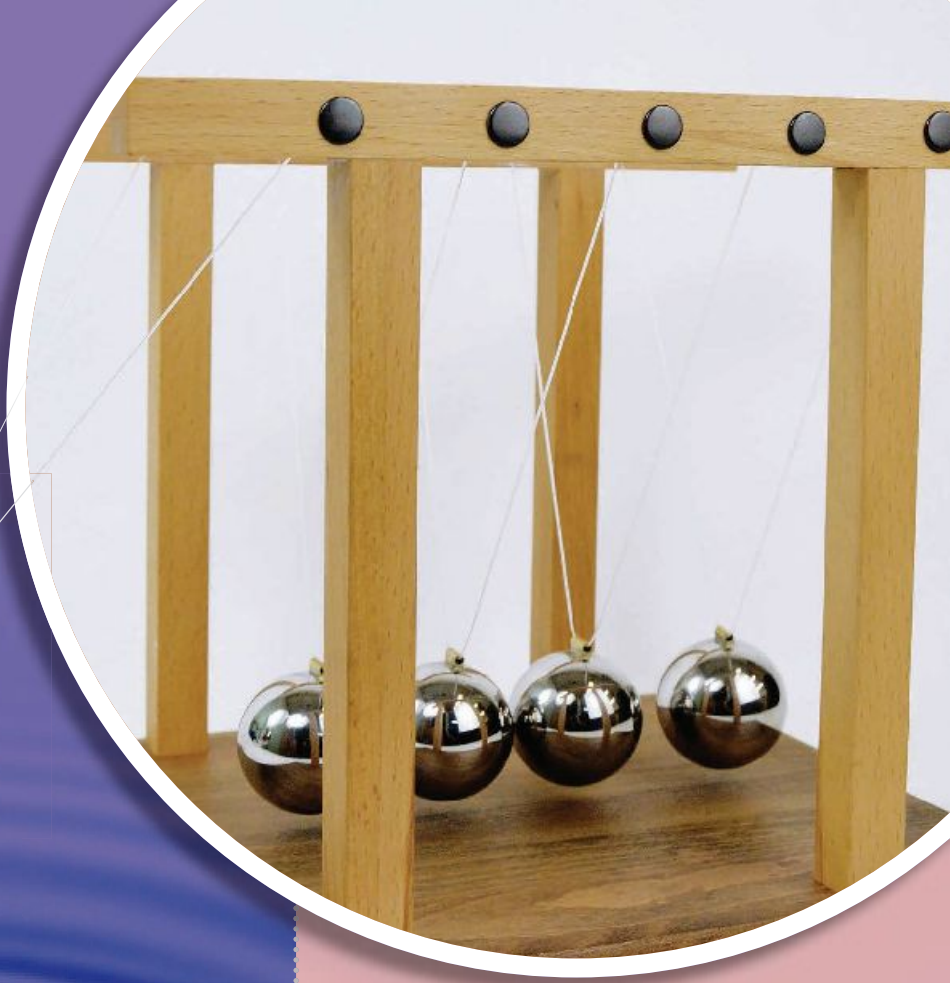


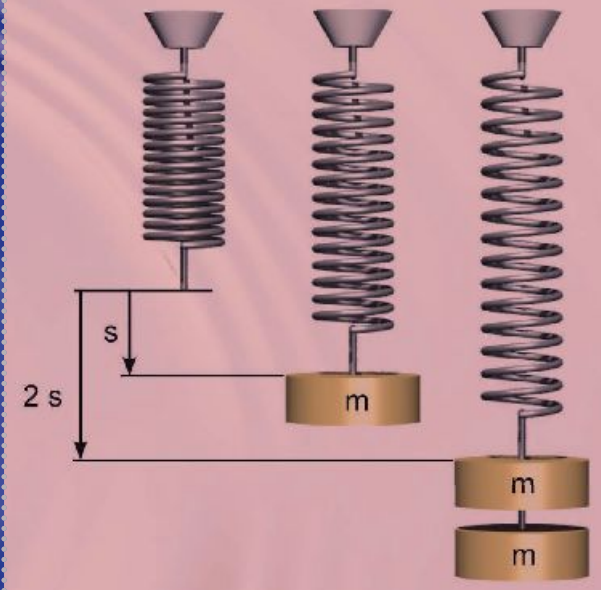
Рис. 1.59

1. Объясните, в каких ситуациях деревянный брусок движется.
2. При каких условиях брусок движется равномерно?
3. В каком случае брусок движется с ускорением?

ГЛАВА II



МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ



В этой главе вы узнаете о следующих темах:

- механические колебания;
- математические и пружинные маятники;
- механические волны;
- звуковые волны.

ТЕМА 15

МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ

1. Механические колебания.
2. Свободные и вынужденные колебания.
3. Период, частота и циклическая частота колебаний.
4. Автоколебания.
5. Явление резонанса.
6. Гармонические колебания.



Несколько человек «раскачивают» застрявшую в грязи машину, помогая водителю вытащить ее. Обычно раскачивание выполняется по чьей-либо команде. Играет ли роль момент времени этих команд?

1. Механические колебания

В повседневной жизни мы сталкиваемся со множеством колебательных движений на каждом шагу. Например, колеблются ветки деревьев, дрожат струны музыкального инструмента, бьётся сердце и т. д. Что же такое колебания? Колебательные движения возникают под действием внешних и внутренних сил.

Движение, которое повторяется периодически через определённые промежутки времени, называется колебательным движением или колебаниями.

Различают два вида колебаний:

– *свободные;*
– *вынужденные.*

2. Свободные и вынужденные колебания

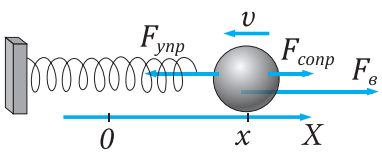


Рис. 2.1

Колебание груза, подвешенного на пружине или струне, является примером свободных колебаний. Крепим стоящий на гладкой горизонтальной поверхности предмет к пружине (рис. 2.1). Выводим тело из равновесия и отпускаем. В результате тело совершит колебательное движение, проходя положение равновесия. Сила упругости, создаваемая пружиной, является внутренней силой, вызывающей колебательное движение. Если сила сопротивления движению намного меньше силы упругости, то движение тела повторяется через равные промежутки времени.

Колебательные движения тела под действием внутренних сил после выведения из положения равновесия всей системы называются свободными колебаниями.

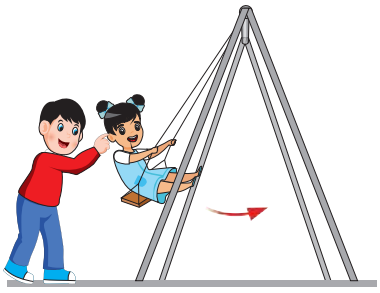


Рис. 2.2

На самом деле, на любое колеблющееся тело действует сила сопротивления среды, которая гасит колебательное движение. Чтобы колебания не затухали, необходимо воздействие внешней силы. (рис. 2.2)

Колебания, совершающиеся под воздействием внешней периодической силы, называются вынужденными.

Можно привести много примеров вынужденных колебаний из повседневной жизни. Например, мембраны радиодинамиков колеблются под воздействием проходящего через них вынуждающего тока. (рис. 2.3).

3. Период колебаний, частота и циклическая частота

Любое колеблющееся тело совершает периодические колебания в течение некоторого периода времени. Этот процесс описывается физическими величинами, называемыми периодом и частотой колебаний.





Рис. 2.3

Время, за которое тело совершает одно полное колебание, называется периодом колебаний. Период колебаний обозначается буквой *T*.

Единицей периода колебаний в системе СИ является секунда (s). Период колебаний вычисляется следующим образом:

$$T = \frac{t}{N}. \qquad (1)$$

Чтобы узнать, является ли колебание материальной точки быстрым или медленным, вводится понятие частоты колебаний.

Физическая величина, равная числу колебаний в единицу времени, называется частотой колебаний. Частота вибрации обозначается буквой ν (нью).

Когда колеблющаяся материальная точка колеблется *N* раз за время *t*, частота её колебаний вычисляется по формуле:

$$\nu = \frac{N}{t}. \qquad (2)$$

Итак, согласно выражениям (1) и (2), период и частота колебаний находятся в обратной зависимости друг от друга.

Единицей измерения частоты является – $[\nu] = \frac{[N]}{[t]} = 1\ s^{-1}$=(Hz) герц (Hertz). Он был назван в честь немецкого физика Генри Герца.



Генри Герц
(1857–1894)

Величина, характеризуемая числом колебаний тела за 2π секунды, называется циклической частотой. Циклическая частота обозначается буквой ω (омега).

$$\omega = 2\pi/T.$$

За единицу циклической частоты в СИ принята $[\omega]$=1rad/s.

Период колебаний и частота колебаний связаны с циклической частотой следующим образом:

$$\omega = 2\pi/T = 2\pi\nu. \qquad (3)$$

Смещение и амплитуда колебаний

Расстояние, на которое колеблющееся тело удаляется от положения равновесия, называется его ***смещением***. Смещение обозначается буквой *x*. Наибольшее смещение (отдаление) от состояния равновесия называется ***амплитудой колебаний***. Амплитуда обозначается через A или x_{max} (рис. 2.4).

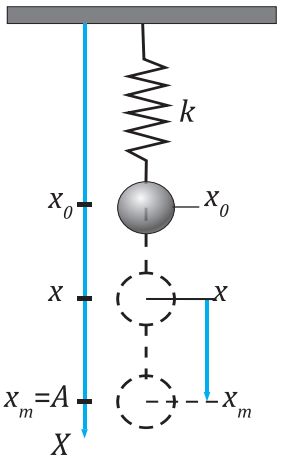


Рис. 2.4

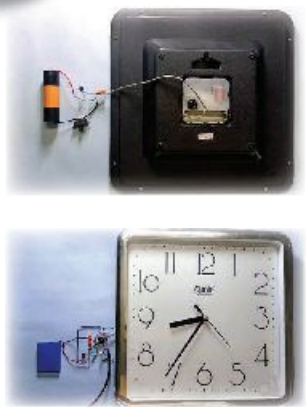


Рис. 2.5

4. Автоколебания

Для того, чтобы получить незатухающие колебания, необходимо воздействовать на систему внешней периодической силой. Но колебания в системе могут быть незатухающими и без воздействия внешней периодической силы. Если внутри системы, способной совершать свободные колебания, имеется источник энергии и система сама может регулировать поступление энергии к колеблющемуся телу для компенсации потерь на трение, то в ней могут возникнуть незатухающие колебания.

Автоколебания – это незатухающие колебания, возникающие за счёт энергии внутреннего источника без влияния внешней периодической силы.

Например, электронные часы, электрический звонок, сердце и лёгкие человека можно считать автоколебательными системами (рис. 2.5).

5. Явление резонанса

Вынужденные колебания могут иметь не только полезные, но иногда и вредные последствия. Какими они бывают?

Явление резонанса имеет большое практическое значение в быту и технике. Оно используется не только в механике, но и в электротехнике, оптике и ядерной физике. Например, работа радиоприёмников, телевизоров и т. д. основана на явлении резонанса.

Однако резонанс также может привести к негативным последствиям. Например, на определённых звуковых частотах корпус радиоприёмника иногда вибрирует, искажая звуковые волны; ритмично работающее оборудование предприятия может вызвать явление резонанса с архитектурой здания, в результате чего может произойти разрушение стен и фундамента.

Явление резкого увеличения амплитуды вынужденных колебаний, при котором частота внешней силы, действующей на колебательную систему, равна собственной частоте колебаний системы, называется резонансом.

Катастрофические последствия резонанса

Мост Такома расположен в штате Вашингтон, США. Он рухнул 7 ноября 1940 года из-за явления резонанса, когда скорость ветра достигла 65 km/h.



6. Гармонические колебания

Наполним песком ёмкость с отверстием на дне, подвесим её на верёвке и раскачаем. Если подложить под ёмкость кусок картона и тянуть его с неизменяемой скоростью, можно увидеть, что следы рассыпавшегося песка на бумаге колеблются с определённой закономерностью. Из этого эксперимента следует вывод: перемещение колеблющегося сосуда изменяется со временем по законам синуса или косинуса (рис. 2.6).

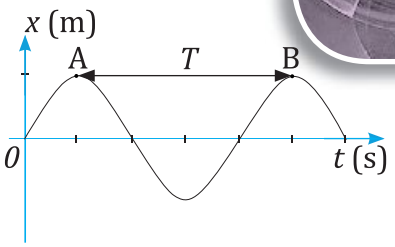
Колебания, в которых с течением времени параметры меняются по закону синуса или косинуса, называются гармоническими колебаниями.

Гармонические колебания являются простейшими колебаниями. Смещение тела при гармонических колебаниях вычисляется по следующему выражению:

$$x = A\sin(\omega t+\varphi_0) \text{ или } x = A\cos(\omega t+\varphi_0). \quad (5)$$

Здесь: A – амплитуда колебаний, ω – циклическая частота, t – время, φ_0 – начальная фаза.

Согласно формуле (5), при гармоническом движении график смещения во времени представляет собой синусоиду (т.е. график выражен по синусоидальному закону). Время между двумя соседними вершинами на графике равно периоду колебаний (рис. 2.7).



Движение маятника часов представляет собой механическое колебание, а изменение направления электрического тока – электромагнитное колебание.

1. Изменится ли период колебаний качелей, если вместо одного человека сядут двое?

2. Почему во время остановки поезда машинист стучит по колёсам?

3. Какие величины характеризуют колебательное движение?

4. Как изменится частота колебаний стального шарика, подвешенного на нити, если под ним поместить сильный магнит?

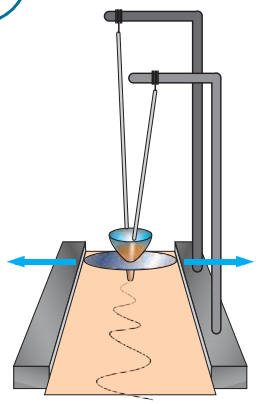


Рис. 2.6

Пример решения задач

Уравнение гармонических колебаний материальной точки имеет вид $x = 0{,}02\cdot\cos\pi t$. Найти смещение точки через 0,25 s и 1/3 s.

Дано:	Формула:	Решение:
$x = 0{,}02\cos\pi t$ $t_1 = 0{,}25$ s $t_2 = 1/3$ s	$x = A\cos(\omega t)$	$x_1 = 0{,}02\cos(\pi 0{,}25) = 0{,}02\cdot\frac{\sqrt{2}}{2} = 0{,}0141$ m $= 1{,}41$ cm $x_2 = 0{,}02\cos(\pi 1/3) = 0{,}02\cdot 1/2 = 0{,}01$ m $= 1$ cm
x_1=? x_2=?		**Ответ:** $x_1 = 1{,}41$ cm; $x_2 = 1$ cm.

Упражнение 12

1. Уравнение колебаний точки имеет вид $x = 0{,}2\sin\frac{\pi}{4}t$ (m). Амплитуда (A) равна периоду (T). $T = T/4$. Найти смещение x в момент времени $t_1 = T/4$.

2. Амплитуда движущейся материальной точки 0,5 mm, частота 2 kHz. Какой путь проходит точка за 0,1 s?

3. Найти амплитуду, частоту и период колебаний материальной точки, уравнение движения которой $x = 0{,}06\cos 100\pi t$.

4. Колебание материальной точки изменяется по закону $x = 0{,}2\sin(\pi t + \pi/2)$ (m). Найти амплитуду колебаний A, период T, циклическую частоту ω, начальную фазу φ_0.

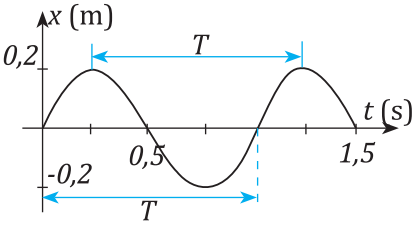
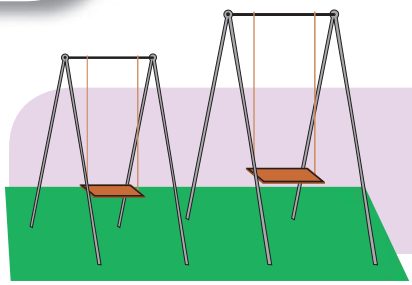


Рис. 2.7

ТЕМА 16 ПРУЖИННЫЕ И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МАЯТНИКИ

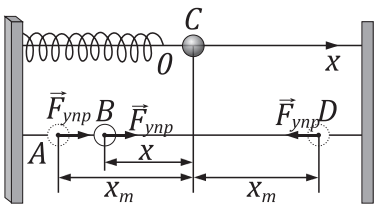
1. Пружинный маятник.
2. Математический маятник.



Какие качели лучше выбрать – высокие или низкие? Объясните почему..

1. Пружинный маятник

Тело, прикреплённое к пружине и совершающее колебания под действием силы упругости, называется пружинным маятником.



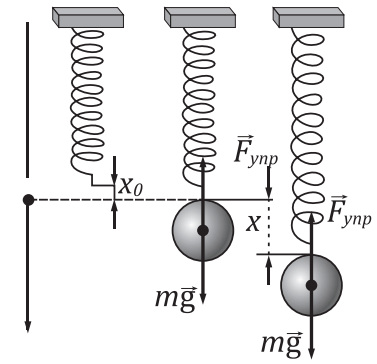


Рис. 2.8

Сила упругости, возникающая при приложении нагрузки к пружине, рассчитывается по следующей формуле:

$$F = -k\Delta x. \quad (1)$$

Здесь: k – жёсткость пружины, Δx – насколько пружина растянута или сжата (рис. 2.8).

Если мы растянем пружину с грузом из положения равновесия на амплитуду A и отпустим, то её смещение будет выражено следующим образом:

$$x = A \cdot cos(\omega t). \quad (2)$$

В данном случае ω – циклическая частота, которая определяется массой объекта и жесткостью пружины:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}},$$

а период и частота подвешивания груза на пружине выражаются следующими формулами:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}, \quad (3)$$

$$\nu = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}}. \quad (4)$$

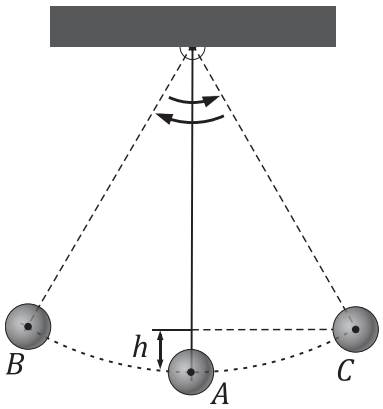


Рис. 2.9

2. Математический маятник

Тело, подвешенное на длинной нерастяжимой невесомой струне и колеблющееся под действием силы тяжести, называется математическим маятником.

Если не учитывать силы сопротивления, математический маятник совершает гармонические колебания только под действием силы тяжести. Сила тяжести — это внутренняя сила, действующая на математический маятник (рис. 2.9).

Если мы выведем из равновесия тело, подвешенное на шнуре, оно начнёт колебаться, как маятник на пружине. Смещение тела от центра тяжести записывается следующим образом:

$$x = A \cdot \cos(\omega t). \quad (5)$$

Определение циклической частоты через длину маятника (l) и ускорение свободного падения (g):

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{l}}.$$

Период колебаний математического маятника находится по формуле:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}. \quad (6)$$

Это формула, определяющая период математического маятника, называется формулой Гюйгенса.

Частота колебаний математического маятника находится по формуле:

$$\nu = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{g}{l}}. \quad (7)$$

1. Какие физические величины надо изменить и во сколько раз, чтобы удвоить циклическую частоту пружинного маятника?

2. За счёт какой силы колеблется математический маятник?

3. При каком условии колебания математического маятника гармоничны?

4. Какой вид будет иметь выражение смещения математического маятника с грузом, выведенным из равновесия? А пружинного маятника?

Пример решения задачи

Период колебаний первого маятника 3 s, второго 4 s. Каков период колебаний математического маятника, длина которого равна сумме длин указанных маятников?

Дано:	Формула:	Решение:
$T_1 = 3$ s; $T_2 = 4$ s	$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ $\quad T_1 = 2\pi\sqrt{\frac{l_1}{g}}$ $T_2 = 2\pi\sqrt{\frac{l_2}{g}}$ $\quad T = 2\pi\sqrt{\frac{l_1 + l_2}{g}}$ $l = l_1 + l_2$ $\quad T = \sqrt{T_1^2 + T_2^2}$	$T = \sqrt{3^2 + 4^2}\,\text{s} = 5$ s **Ответ:** T = 5 s.
T=?		

Упражнение 13

1. Как изменится период свободных (собственных) колебаний математического маятника, если уменьшить его длину в 16 раз?

2. Когда маятник свободно колеблется, он отклоняется в крайнее положение 15 раз за одну минуту. Какова частота его колебаний?

3. Каков период колебаний подвешенного на пружине груза массой 1 kg, если пружина под действием силы 6 N растянулась на 1,5 cm?

4. Подвешенный на пружине груз за 1 минуту совершил 36 колебаний. Найдите циклическую частоту колебаний.

ТЕМА 17

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСКОРЕНИЯ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МАЯТНИКА

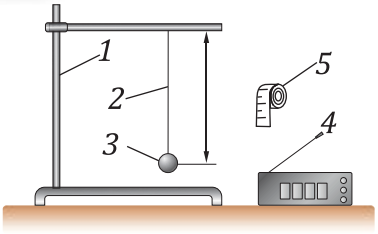


Рис. 2.10

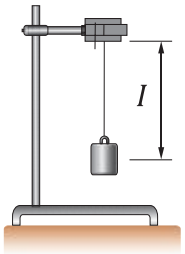
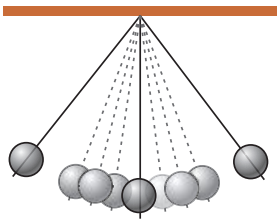


Рис. 2.11


Рис. 2.12

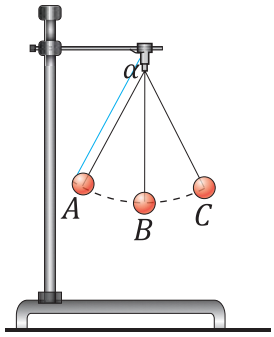


Рис. 2.13

Цель работы: изучить метод определения ускорения свободного падения с помощью математического маятника.

Необходимое оборудование: лабораторный универсальный стенд; нерастяжимая нить; шарик; секундомер; измерительная лента (рис. 2.10).

Порядок выполнения работы:

1. Прикрепите нить к штативу как можно длиннее.
2. Измерьте длину нити с помощью измерительной ленты. В этом случае, поскольку радиус шарика много меньше длины нити маятника, им можно пренебречь (рис. 2.11).
3. Отклоните шарик на небольшой (6°–8°) угол от положения равновесия и отпустите его, и в тот же момент включите секундомер (рис. 2.12).
4. Запишите время, за которое маятник совершит заданное количество колебаний (например, 20 раз).
5. Найдите период колебаний по формуле $T = t/N$.
6. Найдите численное значение ускорения свободного падения по формуле $g = \frac{4\pi^2 r}{T^2}$.
7. Повторите опыт, увеличив число колебаний до N_2=30 и N_3=40 без изменения длины нити маятника (рис. 2.13).
8. По полученным результатам определите численные значения ускорения свободного падения.
9. Заполните следующую таблицу на основе полученных результатов.
10. Найдите абсолютные и относительные ошибки.

$l_{нити}$ (m)	N, (раз)	t, (s)	g, (m/s^2)	$\bar{g}_{ср}$ (m/s^2)	Δg, (m/s^2)	$\Delta\bar{g}_{ср}$, (m/s^2)	$\varepsilon = \frac{\Delta\bar{g}}{g_{ср}}100\%$
	20						
	30						
	40						

1. Почему период колебаний математического маятника не зависит от массы шарика?

2. Если тот же эксперимент провести на других планетах, будут ли результаты другими?

3. Зависит ли период колебаний математического маятника от его размеров?

4. Может ли период колебаний математического маятника быть одинаковым на земном экваторе и на полюсе?

1. Поперечные и продольные волны
2. Волновые характеристики

Мы не замечаем, как вода ударяется о берега арыка, но замечаем, как вода бьётся о берега озёр и рек. Почему?

1. Поперечные и продольные волны

Мы обычно называем волнами гребни на водной глади океанов, рек и морей. Как образуются волны? Когда в среде возникают колебания, они распространяются через частицы среды.

Распространение механических колебаний в среде называется механической волной.

При распространении волн частицы среды не движутся, а колеблются вокруг положения равновесия. Колебательное движение и волновая энергия передаются от частицы к частице. Поэтому для всех волн характерен перенос энергии, а не материи.



Механические волны делятся на два типа:

1. Продольные;
2. Поперечные.

В ***продольных волнах*** частицы среды колеблются в направлении распространения волны (рис. 2.14). К продольным волнам относятся все звуковые, ультразвуковые и механические волны, распространяющиеся внутри жидкости.

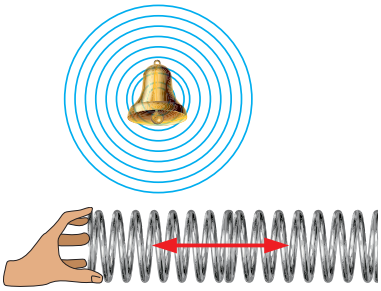


Рис. 2.14

В ***поперечных волнах*** частицы среды колеблются в направлении, перпендикулярном направлению распространения волны (рис. 2.15). К поперечным волнам относятся волны на поверхности воды, волны, распространяющиеся в вибрирующей струне, и электромагнитные волны.

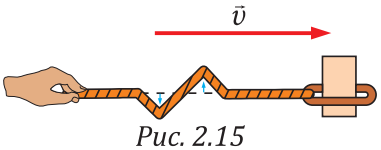


Рис. 2.15

В газах распространяются только продольные волны. На поверхности жидкости распространяется поперечная волна, а внутри жидкости распространяется продольная волна. В твёрдых телах распространяются как продольные, так и поперечные волны.

2. Волновые характеристики

Механические волны характеризуются такими величинами, как частота волны, длина волны, скорость распространения.

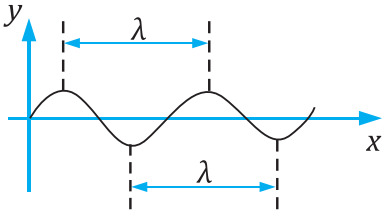


Рис. 2.16

Частота волны объясняется частотой колебаний частиц среды.

Период колебаний в волне обратно пропорционален частоте волны:

$$T = 1/\nu \qquad (1)$$

Расстояние, которое проходит волна за один полный период колебаний, называется длиной волны. Длина волны обозначается буквой λ (лямбда), единицей измерения которой является метр (m).

$$\lambda = \upsilon T. \quad (2)$$

$$\lambda = \upsilon / \nu. \quad (3)$$

где y – скорость распространения волны, n – частота, T – период (рис. 2.16).

1. С какими волнами вы сталкивались в природе?

2. В чём разница между поперечными и продольными волнами?

3. Волны не содержат вещества среды, в которой они распространяются. Почему же тогда они ударяются о берег?

Пример решения задач

На поверхности воды в озере волны распространяются со скоростью 6 m/s. Каковы период и частота колебаний плавающего в озере пластикового контейнера, если расстояние между соседними гребнями 1,5 m?

Дано:	Формула:	Решение:
υ = 6 m/s λ = 1,5 m T = ? ν = ?	$\lambda = \upsilon T$ $\lambda = \upsilon / \nu$ $T = \lambda / \upsilon$ $\nu = \upsilon / \lambda$;	$T = \frac{1,5\,\text{m}}{6\,\text{m/s}} = 0,25\ \text{s}$; $\nu = \frac{6\,\text{m/s}}{1,5\ \text{m}} = 4\,\text{Hz}$ **Ответ:** T = 0,25 s; ν = 4 Hz.

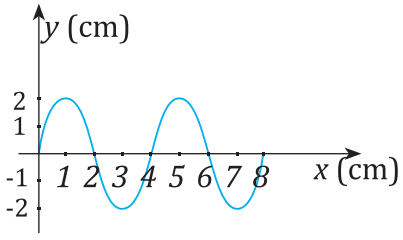
Упражнение 14

1. Рыбак определил, что расстояние между гребнями волн, образующихся в воде, равно 6 m, а скорость их движения равна 2 m/s. Если он определит период колебаний удочки за счёт этих волн, какое значение (s) он получит?

2. По струне распространяются колебания частотой 4 Hz со скоростью 8 m/s. Найдите длину волны (m).

3. Если период распространения волны в среде 10 s, а длина волны 5 m, то какова скорость распространения волны?

4. Найдите длину (m) волны, если за время, в течение которого частица среды совершает 140 колебаний, волна распространяется на 70 m.



Дополнительное задание

Найдите длину волны по графику:

ТЕМА 19 ЗВУКОВЫЕ ВОЛНЫ

1. Что такое звук?
2. Скорость звука.
3. Величины звука.
4. Ультразвук.
5. Инфразвук.



Почему интерьер театральных зданий спроектирован так, как показано на рисунке?

1. Что такое звук?

Мир полон разных звуков: тиканье часов, рёв моторов автомобилей, шелест листьев, пение птиц, свист ветра и т. д. Что такое звук и как он возникает? Как распространяется звук (рис. 2.17)?

Механические волны, которые может услышать человек, называются звуковыми волнами.

Ещё древние люди заметили, что звуки исходят от вибрирующих в воздухе предметов.





Рис. 2.17

Звук представляет собой механическую волну, которая распространяется в упругой среде и не может распространяться в вакууме. Частота звуковых волн, воспринимаемых человеческим ухом, находится в диапазоне 17-20000 Гц. Когда звуковые волны достигают человеческого уха, барабанная перепонка вынуждена вибрировать, и человек слышит звук.

2. Скорость звука

Звук – это колебательное движение частиц упругой среды, распространяющееся в виде волн в газообразной, жидкой или твёрдой среде.

Распространение звука в газах. Замечали ли вы, что звук из динамиков, расположенных на разном расстоянии на стадионе, или из телевизоров в двух соседних домах, доносится не одновременно? А то, что звуки запущенного в небо салюта слышны после его взрыва? Так же во время грозы звук грома слышен после молнии. Так происходит потому, что скорость распространения звука в воздухе намного меньше скорости распространения света.

Инструмент, издающий звук определённой частоты, называется камертоном. Камертон был изобретён английским музыкантом Дж. Шором в 1711 году и использовался для настройки музыкальных инструментов. Камертон состоит из металлического стержня с двумя зубцами и ручкой посередине.

Определённый звук слышен при ударе резиновой палочкой по ветке камертона. Для усиления звука, исходящего от камертона, его помещают в деревянный ящик. Функция этого ящика – резонатор, то есть усилитель звука. Рот человека подобен камертону. Если язык является колеблющимся телом, то полость рта и глотка выступают в роли резонатора (рис. 2.18).



Рис. 2.18

При температуре воздуха 0 °C скорость распространения звука приблизительно равна y = 330 m/s. Скорость распространения звуковых волн зависит от типа, состояния и температуры среды. Скорость распространения звука в воздухе впервые была измерена в 1636 г. французским учёным М. Мерсенном. При температуре воздуха 20 °C скорость распространения звука равнялась 343 m/s. Скорость звука увеличивается с повышением температуры воздуха.

Распространение звука в жидкостях. Звуковые волны распространяются как в газах, так и в жидкостях. Но скорость распространения звука различна в разных средах. Причиной этого является более разрежённое или более плотное расположение частиц среды. Поскольку жидкости плотнее газов, звук в них распространяется быстрее. Кроме того, скорость звука в жидкости зависит от её состава. Скорость звука в воде впервые была измерена в 1826 г. Ж.-Д. Колладоном и Ш. Штурмом на Женевском озере в Швейцарии. Температура воды была равна 8°C, а скорость звука оказалась равной 1440 m/s.

Распространение звука в твёрдых телах. Поскольку плотность твёрдых тел больше, чем плотность газов или жидкостей, звук в твёрдых телах распространяется с ещё большей скоростью. Например, в железе при температуре 20 °C скорость распространения звука равна 5850 м/с.

В отличие от газов и жидкостей в твёрдых телах распространяются как продольные, так и поперечные волны. Скорость продольной звуковой волны:

$$\upsilon_{про} = \sqrt{\frac{E}{\rho}}.$$

Скорость распространения поперечной волны рассчитывается по формуле:

$$\upsilon_{поп.} = \sqrt{\frac{G}{\rho}}.$$

Здесь E – модуль Юнга для среды, а G – модуль смещения. Скорость распространения продольных волн в твёрдых телах почти в два раза больше скорости распространения поперечных волн, так как $E > G$.

Звуковые волны считаются продольными независимо от среды, в которой они распространяются.

3. Величины звука

Громкость звука. Громкость звука определяется амплитудой. Звук имеет энергию. Громкость звука определяется на основании закона, сформулированного немецкими физиками В. Вебером и Г. Фехнером в 1858 г. Уровень интенсивности самого слабого звука, который воспринимает наше ухо, соответствует 1 белу (1B). Эта единица названа в честь изобретателя телефона А. Белла. Болевой порог принимается равным 130 dB (1 dB = 0,1 B).

Соответственно, уровень интенсивности тихого разговора – 40 dB, шума – 80 dB, самолёта – 110–120 dB.

Высота звука. Высота звука определяется его частотой. Частота женского голоса намного выше мужского.

Звуковой тембр. Звуковой тембр – это величина, характеризующая чистоту частотного распределения звуковых колебаний. Певцы, поющие на одной и той же ноте, будут иметь разный тембр.

В зависимости от тона мужские голоса подразделяются на бас (80–350 Hz), баритон (110–400 Hz), тенор (230–520 Hz), а женские на сопрано (260 Hz–1050 Hz), контральто (170–780 Hz), меццо-сопрано (200–900 Hz) и колоратурное сопрано (260–1400 Hz).



4. Ультразвук

Звуковые волны с частотой более 20 000 Hz называются ультразвуками.

Уши человека не воспринимают ультразвук (лат. *ultra* – сверх, чрезмерно). Но органы чувств некоторых животных работают с помощью ультразвука. Например, такие животные, как пчёлы, дельфины и летучие мыши, используют ультразвук для обнаружения препятствий или поиска добычи. Ультразвук также широко используется в технике. Например, при изучении физических свойств веществ, механической обработке предметов, эхолокации, в медицине и других областях (рис. 2.19). С помощью эхолокации определяют местоположение предметов или расстояние до них. Для этого принимается ультразвук, посланный от источника и вернувшийся от тела (рис. 2.20). Если время прохождения ультразвука к объекту (t) и обратно равно, то расстояние до него (s) определяется как:

$$s = \frac{\upsilon t}{2}.$$

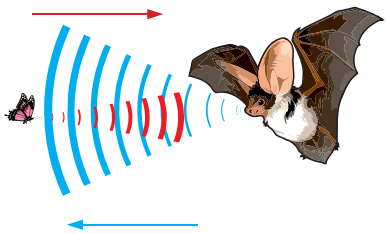


Рис. 2.19

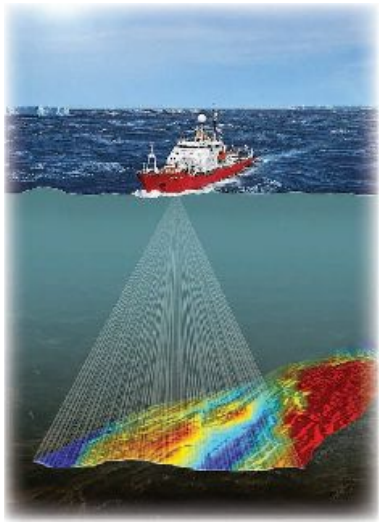


Рис. 2.20

5. Инфразвук

Упругие волны с частотой ниже 17 Hz называются *инфразвуком*.

Инфразвук (*лат.* infra – нижний, низкий, внизу) – низкочастотные упругие волны, не слышимые человеческому уху. Инфразвук очень плохо поглощается окружающей средой, поэтому распространяется на большие расстояния по воздуху, воде и поверхности земли. Эти свойства инфразвука используются для изучения верхних слоёв атмосферы, земной коры, для определения дальности сильного взрыва и распространяющихся в морях волн (рис. 2.21).



Рис. 2.21

1. *От чего зависит громкость звука?*
2. *От чего зависит высота звука?*
3. *Объясните образование звуковых волн. Какие величины их характеризуют?*
4. *Какая величина передаётся волной?*

Пример решения задачи

Мальчик, стоящий перед скалой, услышал эхо своего голоса через 2 s. Чему равно расстояние от мальчика до скалы?

Дано:	Формула:	Решение:
$v = 340\,\frac{m}{s}$ $t = 2$ s $s = ?$	$s = \frac{\upsilon t}{2}$	$s = \frac{340\,\frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 2\text{s}}{2} = 340$ m **Ответ:** $s = 340$ m.

Упражнение 15

1. Какова глубина моря (km), если сигнал гидролокатора получен через 1,6 секунды? Скорость звука в воде 1500 m/s.

2. Звук переходит из воздуха в воду. Как изменится его частота? Скорость звука в воде 1480 m/s, в воздухе 340 m/s.

3. Расстояние между двумя железнодорожными станциями 8,3 km. Сколько времени требуется звуку, чтобы добраться от одной станции до другой по железной дороге? (Скорость звука в стали при температуре 20 °C равна 5100 m/s).

Дополнительные задания

1. Электрический звонок поместили в стеклянную ёмкость. После того, как воздух из ёмкости откачали, звук звонка пропал. Почему так произошло?





2. Звук в зале без зрителей громче, чем при полном зале. Объясните почему.

Пример решения задачи

1. Тело совершает колебания по уравнению $x = A\cos(\omega t)$. Найдите амплитуду, период и частоту колебаний, если колеблющееся тело проходит 50 cm за 0,8 s. Возьмем $\omega = 2{,}5\pi\ \text{s}^{-1}$.

Дано:	Формула:	Решение:
$x = A\cos(\omega t)$ $x = 50\ \text{cm} = 0{,}5\ \text{m}$ $\omega = 2{,}5\pi\ \text{s}^{-1}$	$A = \dfrac{x}{\cos(\omega t)}$ $\nu = \dfrac{\omega}{2\pi}$ $T = \dfrac{2\pi}{\omega} = \dfrac{1}{\nu}$	$T = \dfrac{2\pi}{2{,}5\pi}\text{s} = 0{,}8\ \text{s}.$ $\nu = \dfrac{2{,}5\pi}{2\pi}\cdot\dfrac{1}{s} = 1.25\ \text{s}^{-1} = 1{,}25\,\text{Hz}\ ;$ $A = \dfrac{0{,}5\,\text{m}}{\cos\left(2{,}5\pi\dfrac{1}{s}\cdot 0{,}8\ \text{s}\right)} = 0{,}5\,\text{m}$ $\cos 2\pi = 1$
$T = ?\ \nu = ?\ A = ?$		**Ответ:** $T = 0{,}8\ \text{s}\ ;\ \nu = 1{,}25\ \text{Hz};\ A = 0{,}5\ \text{m}.$

2. Когда к пружине присоединяют и отпускают груз массой m, она растягивается на 9 cm и начинает колебаться. Найдите период колебаний пружины.

Дано:	Формула:	Решение:
$\Delta x = 9\ \text{cm} = 9\cdot 10^{-2}\ \text{m}$	$F = -kx;$ $F = P = m\,g$ $k\Delta x = \text{mg}$ $T = 2\pi\sqrt{\dfrac{m}{k}}$	$T = 2\cdot 3{,}14\cdot\sqrt{\dfrac{9\cdot 10^{-2}\,\text{m}}{9{,}8\ \text{m/s}^2}} = 0{,}6\ \text{s}$
$T = ?$		**Ответ:** $T = 0{,}6\ \text{s}.$

3. Волна на поверхности воды в озере распространяется со скоростью 6 m/s. Найдите период и частоту её колебаний, если длина волны 3 m.

Дано:	Формула:	Решение:
$\upsilon = 6\ \text{m/s}$ $\lambda = 3\ \text{m}$	$\lambda = \upsilon T$ $\lambda = \dfrac{\upsilon}{\nu}\qquad T = \dfrac{\lambda}{\upsilon}$ $\nu = \dfrac{\upsilon}{\lambda}$	$\text{T} = \dfrac{3\,\text{m}}{6\dfrac{\text{m}}{\text{s}}} = 0{,}5\ \text{s}\qquad \nu = \dfrac{6\dfrac{\text{m}}{\text{s}}}{3\,\text{m}} = 2\,\text{Hz}$
$T = ?\ \nu = ?$		**Ответ:** $T = 0{,}5\ \text{s},\quad \nu = 2\ \text{Hz}$

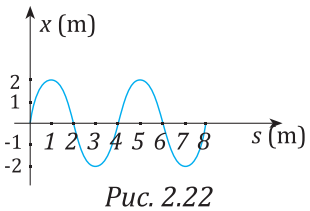


Рис. 2.22

4. Определите длину (m) волны, изображенной на рис. 2.22.

Расчёт: в этом случае расстояние между двумя соседними гребнями равно длине волны. Как видно из рисунка, длина волны 4 m.

Упражнение 16

1. Тело, подвешенное на пружине жёсткостью 250 N/m, за 16 s совершило 20 колебаний. Найдите массу тела (kg).

2. Каково отношение длин двух математических маятников, если за одно и то же время первый из них совершает 10, а второй – 30 колебаний?

3. Какова длина нити маятника, если период колебаний равен 2 s?

4. Тело совершает колебания вдоль оси X по закону $x = 0{,}06\sin(3\pi t)$ (m). Найдите амплитуду, период и частоту колебаний тела.

5. Найдите частоту колебаний груза массой 400 g, подвешенного на пружине жёсткостью 160 N/m.

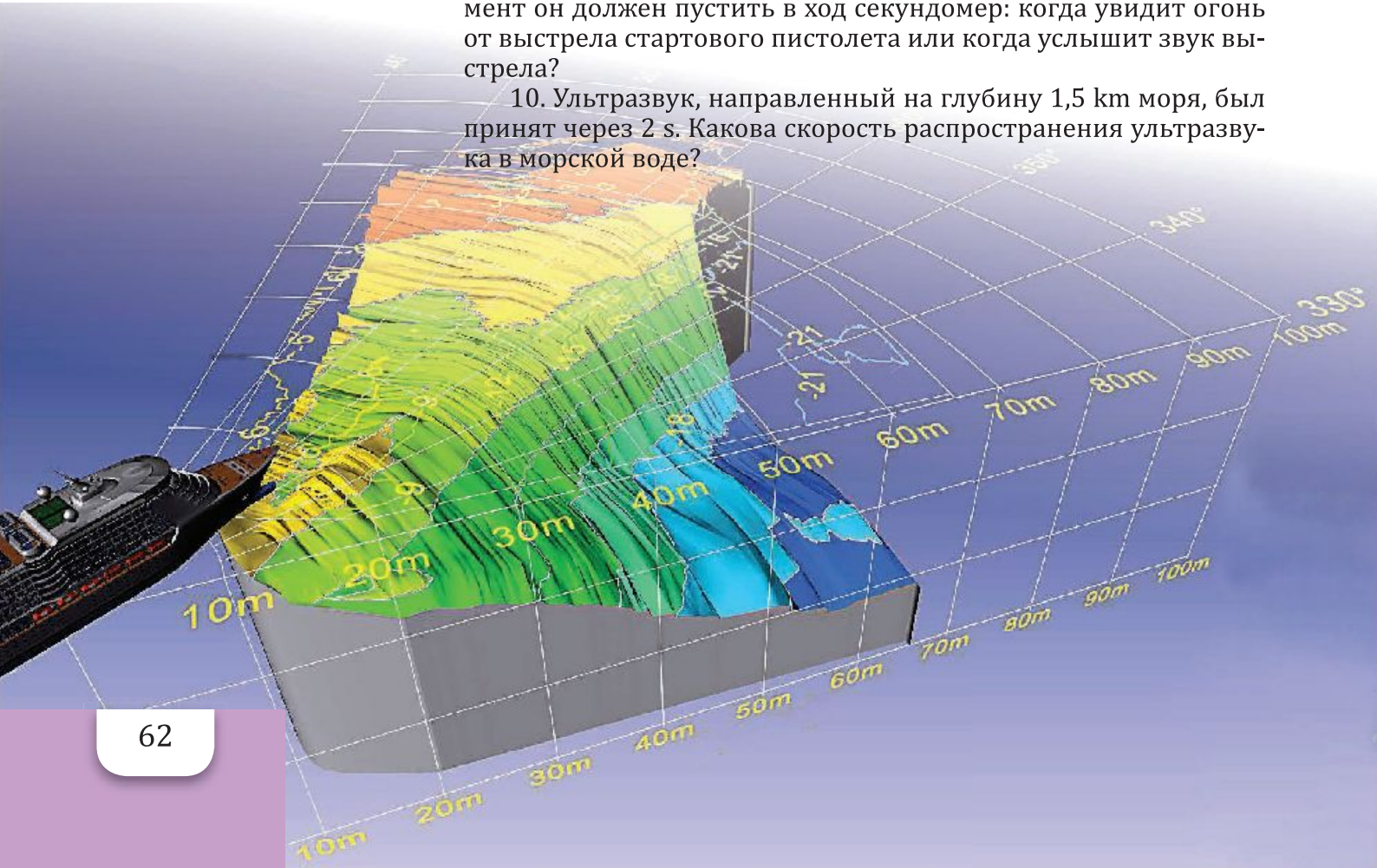
6. Во время грозы человек услышал звук грома через 15 s после вспышки молнии. Как далеко от него произошёл разряд? Скорость звука в воздухе 340 m/s.

7. Расстояние до звукоотражающего барьера 68 m. Через какое время человек услышит эхо?

8. При измерении глубины моря под кораблём при помощи эхолота оказалось, что моменты отправления и приема ультразвука разделены промежутком времени 0,6 s. Какова глубина моря под кораблем? Скорость звука в воде 1500 m/s.

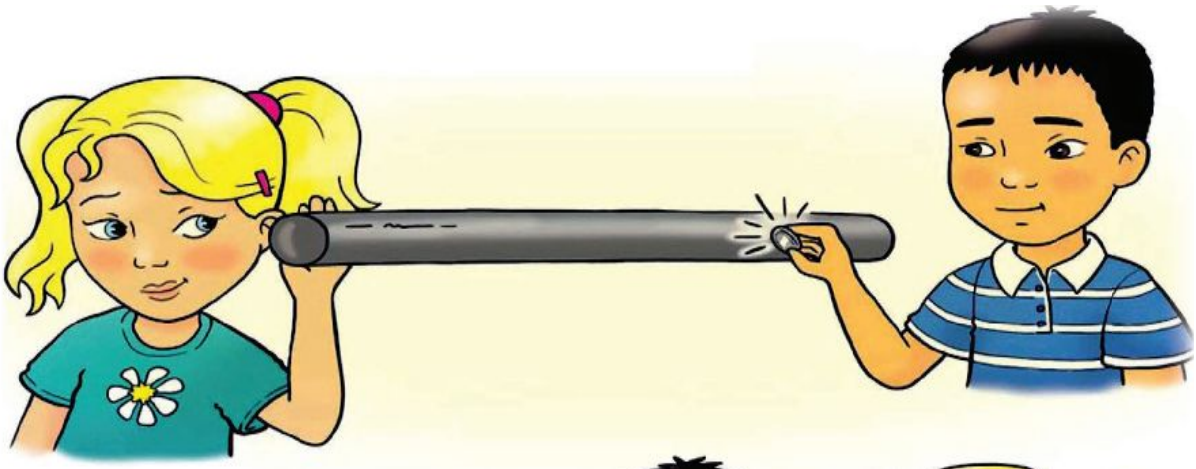
9. Спортивный судья стоит на линии финиша. В какой момент он должен пустить в ход секундомер: когда увидит огонь от выстрела стартового пистолета или когда услышит звук выстрела?

10. Ультразвук, направленный на глубину 1,5 km моря, был принят через 2 s. Какова скорость распространения ультразвука в морской воде?



ЗАДАНИЯ ДЛЯ ЛОГИЧЕСКОГО МЫШЛЕНИЯ ПО ГЛАВЕ II

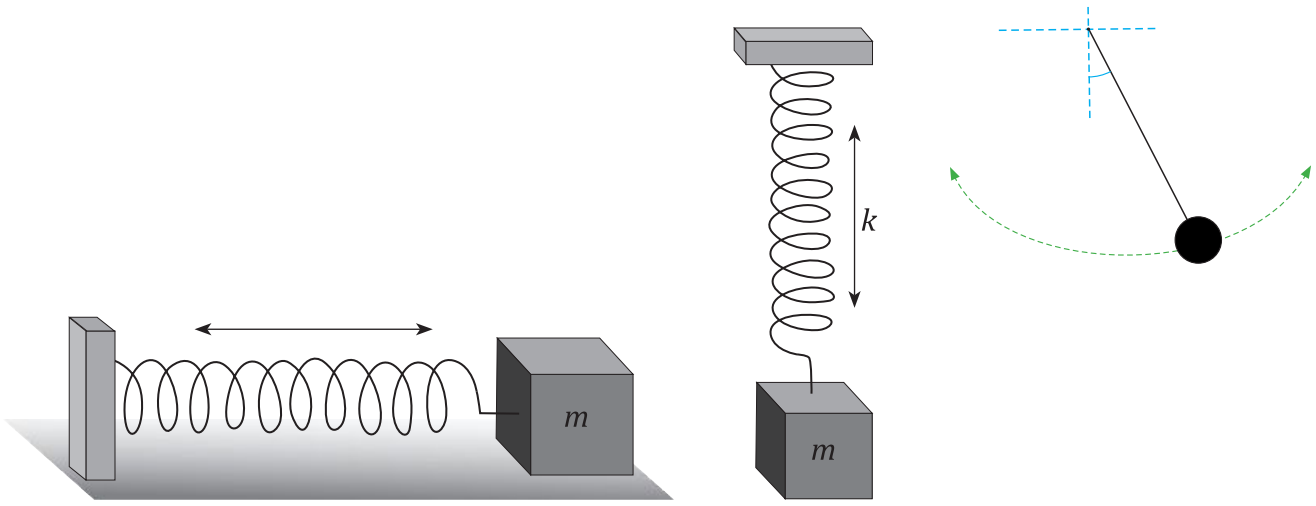
1. Почему в зрительных залах билеты на близкие к сцене места стоят дороже, чем на дальние?



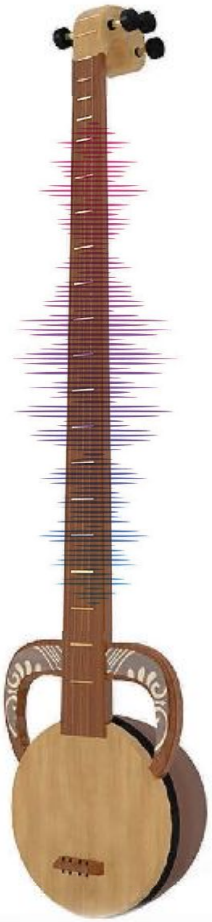
2. Мальчик несильно ударяет по металлической трубе монеткой. В каком из двух случаев на картинке девочка будет слышать звук громче?



3. Изобразите на чертеже физические величины, характеризующие движение колеблющихся тел.



ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ ПО ГЛАВЕ II



1. Какое расстояние и перемещение (в cm) проходит материальная точка за одно полное колебание, если амплитуда её колебаний равна 4 cm?

2. Тело колеблется 60 раз за 2 минуты. Найдите частоту и период колебаний (Hz).

3. Как изменится период колебаний математического маятника при увеличении его длины в 4 раза?

4. Как изменится период колебаний математического маятника при перемещении его с Земли на Луну? $g_{лун}$=1,6 m/s^2, $g_{зем}$=10 m/s^2.

5. Напишите уравнение гармонических колебаний, если амплитуда A = 10 cm, частота ν = 2 Hz и смещение точки в начале времени наибольшее (максимальное).

6. Колебания материальной точки задаются уравнением x = 0,05cos$t$. Найдите период и амплитуду колебаний.
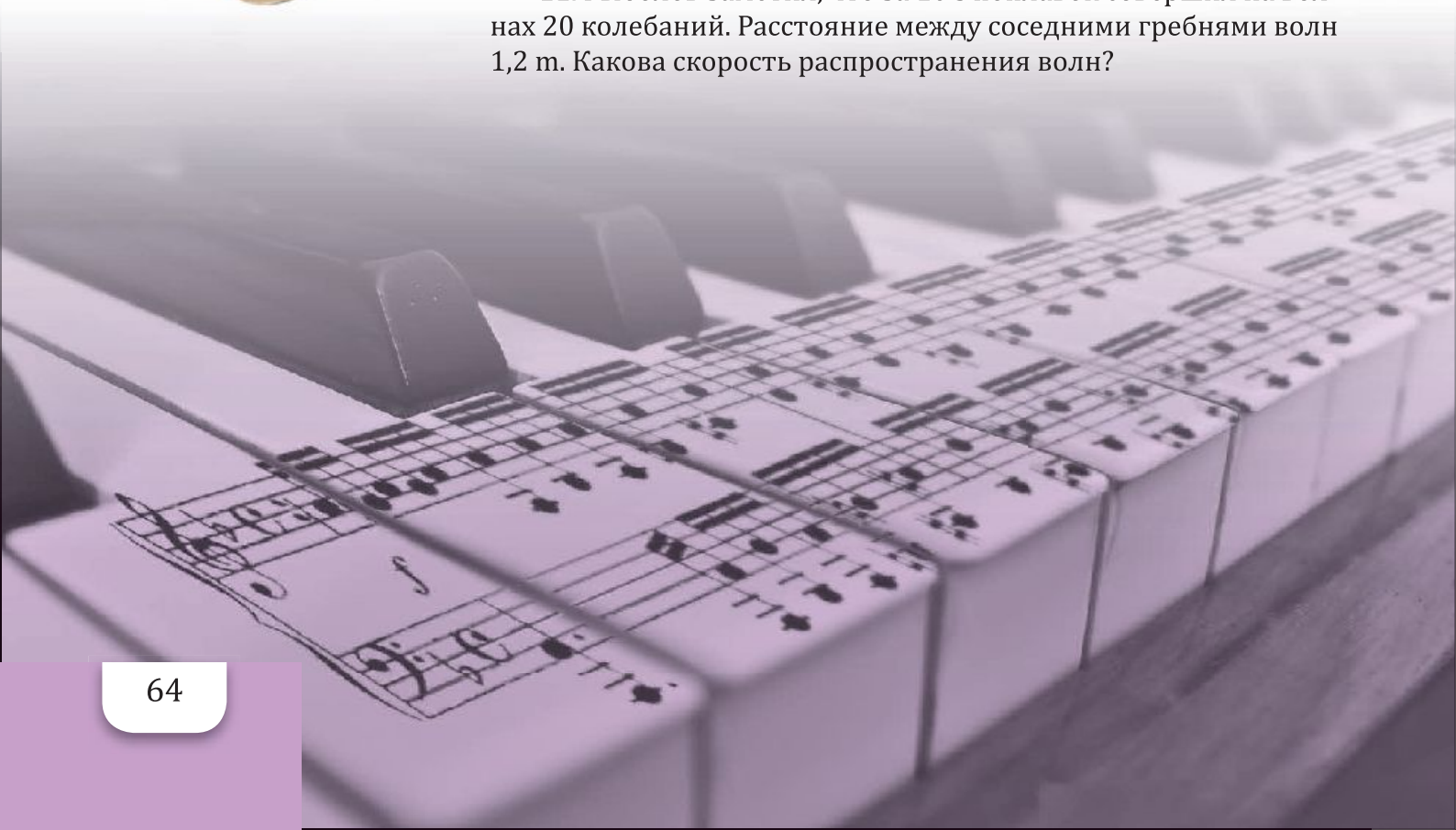
7. Точка совершает гармонические колебания с частотой n = 10 Hz. В момент времени, принятый за начальный, максимальное смещение точки достигало x_m = 1 mm. Напишите уравнение колебаний точки и начертите их график.

8. Точка струны колеблется с амплитудой 1 mm и частотой 1 kHz. Какой путь (в cm) проходит эта точка за 0,2 s?

9. Расстояние между первой и пятой волной поперечной волны 40 m. Найдите длину волны (cm). Какой диапазон частот занимают звуковые волны?

10. Найдите длину поперечной волны, если она распространяется по тонкому эластичному шнуру со скоростью v =15 m/s и периодом T = 1,2 s.

11. Рыболов заметил, что за 10 s поплавок совершил на волнах 20 колебаний. Расстояние между соседними гребнями волн 1,2 m. Какова скорость распространения волн?



ГЛАВА III

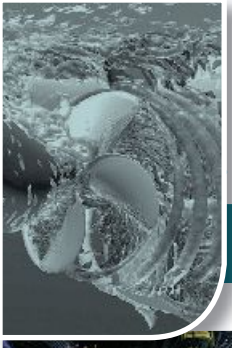


ГИДРОДИНАМИКА И АЭРОДИНАМИКА

В этой главе вы узнаете о следующих темах:

- движение жидкостей и газов
- использование в технике зависимости давления движущегося газа и жидкости от скорости.





ТЕМА 21 ДВИЖЕНИЕ ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ



1. Ламинарный поток.
2. Турбулентный поток.
3. Непрерывность потока.
4. Распределение давления в движущихся жидкостях и газах.

Как вы думаете, как работает городской фонтан?

Вокруг нас много жидкостей. Одни из них двигаются, другие покоятся. В предыдущих классах мы изучали давление, оказываемое покоящимися жидкостями и газами на стенки сосудов.

Состояние движения жидкостей и газов отличается от их состояния покоя. Чтобы убедиться в этом, понаблюдаем за течением воды в ручье. Вода может течь медленно или быстро. В этих случаях расход воды будет разным. Их случаи мы изучим отдельно.

1. Ламинарный поток

В широких канавах или реках вода по краям и в середине течет медленно отдельными слоями, или струями. Это можно наблюдать при движении палочек, плавающих на поверхности воды.

Послойное течение жидкостей или газов называется *ламинарным течением*.

Ламинарное течение



Рис. 3.1

При ламинарном (лат. *lamina* – пластина, слой) течении частицы жидкости или газа движутся прямо, не пересекая пути друг друга. Поэтому слои жидкости или газа не влияют на движение других слоев (рис. 3.1). При течении жидкости или газа в трубке вследствие трения жидкости или газа о стенки трубки смещение слоёв происходит быстрее в средней части трубки и медленнее в наружных частях. Это условие приводит к тому, что слои ламинарного потока текут отдельно друг от друга. Примерами ламинарного течения могут быть кровоток в кровеносных сосудах, подъём воды по капиллярным трубкам в стволе дерева, несильный ветер и подобные явления.

2. Турбулентный поток

При быстром течении жидкости или газа их части находятся не в виде отдельных слоёв, а создают движения в виде вихря, т.е. воронки.



Поток жидкости или газа, образующий завихрения или воронку, называется *турбулентным потоком*.

В турбулентном (лат. *turbulentus* – энергичный, беспорядочный) потоке частицы жидкости или газа движутся неравномерно в разных направлениях. За счёт этого отдельные слои жидкости или газа воздействуют друг на друга и смешиваются (рис. 3.2).

Мы можем наблюдать турбулентные течения в морских, речных и океанских смерчах, песчаные бури в песчаных пустынях, вихри, порывы ветра, вызванные сменой горячих и холодных потоков воздуха в атмосфере, и тому подобные явления.

Турбулентное течение

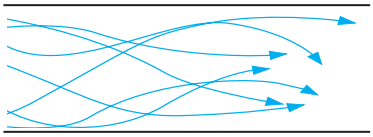


Рис. 3.2

3. Непрерывность потока

Рассмотрим течение жидкости или газа в трубах. Трение между жидкостью или газом и стенкой трубы должно быть очень небольшим. Его мы не учитываем, поэтому скорость потока одинакова во всех точках поперечного сечения трубы. Определим, от чего зависит скорость потока несжимаемой жидкости по трубе с различными поверхностями поперечного сечения в разных частях трубы. Жидкость входит в часть трубы с поверхностью S_1, показанную на рис. 3.3, со скоростью v_1 и выходит из поверхностной части S_2 со скоростью v_2. Через некоторое время Δt с поверхности S_1 вытекает жидкость массы m_1, а с поверхности S_2 – жидкость массы m_2. Так как жидкость несжимаема, то она не скапливается где-то в трубе, а массы жидкостей, протекающих через произвольную площадь поперечного сечения трубы в один и тот же интервал времени Δt, равны. То есть: $m_1 = m_2$. Выражая массу жидкости через её плотность ρ и объём V ($m = rV = rS_y\Delta t$), составим следующее уравнение:

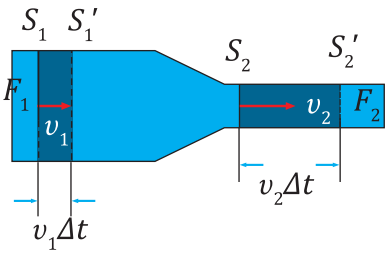


Рис. 3.3

$$\rho_1 S_1 v_1 \Delta t = \rho_2 S_2 v_2 \Delta t,$$

где $\rho_1 = \rho_2$, поэтому мы получаем уравнение:

$$S_1 \cdot v_1 = S_2 \cdot v_2. \qquad (1)$$

Это уравнение называется уравнением непрерывности течения жидкости. При разбрызгивании воды из водяного шланга кончик шланга зажимается, чтобы разбрызгивать воду дальше. Тогда вода выбрасывается с большой скоростью (рис. 3.4).



Рис. 3.4

Численное значение скорости несжимаемой жидкости, текущей в трубе с различной площадью поперечного сечения, обратно пропорционально площади поперечного сечения жидкости. Это называется непрерывностью течения несжимаемой жидкости.



4. Распределение давления в движущихся жидкостях или газах

Давление, оказываемое текущей жидкостью на стенку сосуда, зависит от скорости потока жидкости. В этом можно убедиться, проведя эксперимент. Проследим за течением жидкости по трубке с разными поверхностями, с присоединенными к верхним частям тонкими измерительными трубками (рис. 3.5). При равномерном течении жидкость поднимается по каждой измерительной трубке. В зависимости от высоты столбов можно определить давление, оказываемое жидкостью на стенки трубы. Опыты показывают, что давление в широкой части трубки больше, чем в её узкой части. Согласно уравнению неразрывности потока жидкости, скорость потока в широкой части трубы мала, а в узкой – велика. Математическое выражение зависимости давления жидкости от скорости определил Д. Бернулли в 1738 г.

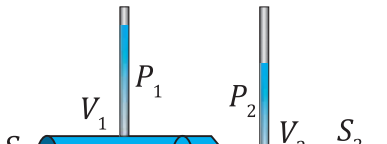


Рис. 3.5

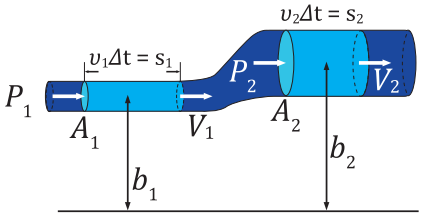


Рис. 3.6

Уравнение Бернулли имеет следующий вид:

$$p_1 + \rho g h_1 + \frac{\rho \upsilon_1^2}{2} = p_2 + \rho g h_2 + \frac{\rho \upsilon_2^2}{2}, \qquad (2)$$

$$\text{или } p + \rho g h + \frac{\rho \upsilon^2}{2} = \text{const}. \qquad (3)$$

Здесь p – статическое давление, $\rho g h$ – гидростатическое давление жидкости, $\frac{\rho \upsilon^2}{2}$ – гидродинамическое давление потока жидкости.

Согласно уравнению Бернулли, гидродинамическое давление мало, а гидростатическое давление велико в широкой части трубы, по которой течет жидкость. Поэтому в приведённом выше опыте (рис. 3.6) трубка, помещённая в широкую часть сосуда, показывает большее давление, чем трубка, помещённая в узкую часть.



Даниил Бернулли (1700–1782)

Пример решения задачи

1. В трубе переменного сечения скорость потока воды в сечении площадью 50 cm² равна 4 m/s. Определить скорость в сечении площадью 10 cm².

Дано:	Формула:	Решение:
$S_1 = 50\ \text{cm}^2 = 50 \cdot 10^{-4}\ \text{m}^2$ $S_2 = 10\ \text{cm}^2 = 10 \cdot 10^{-4}\ \text{m}^2$ $\upsilon_1 = 4\ \text{m/s}$	$S_1 \upsilon_1 = S_2 \upsilon_2$ $\upsilon_2 = \frac{S_1 \upsilon_1}{S_2}$	$\upsilon_2 = \frac{50 \cdot 10^{-4}\ \text{m}^2 \cdot 4\ \frac{\text{m}}{\text{s}}}{10 \cdot 10^{-4}\ \text{m}^2} = 20\ \frac{\text{m}}{\text{s}}$
$\upsilon_2 = ?$		**Ответ:** $\upsilon_2 = 20$ m/s.



Упражнение 17

1. Какое давление создает компрессор в краскопульте, если струя жидкой краски вытекает из него со скоростью 25 m/s? Плотность краски 0,8 g/cm^3.

2. Как изменится поверхность поперечного сечения трубы, если расход жидкости увеличится в 2,8 раза при переходе из одной трубы в другую?

3. Как показано на рис. 3.7, при закрытом кране вода оказывала давление на разные по диаметру участки трубы в соотношении $p_1 = p_2 = p_3$. Каково было соотношение между этими величинами, когда кран открыли?

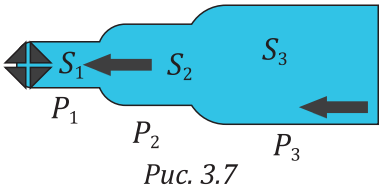


Рис. 3.7

4. Нефть поднимается из скважины по трубе диаметром 60 мм. Найдите скорость потока нефти, если в час поднимается 9,12 t нефти. Плотность нефти 800 kg/m^3.

1. Что вы понимаете под динамическим давлением жидкости?

2. Опишите, каким образом течёт вода там, где вы живёте.

3. Почему давление жидкости уменьшается при увеличении её скорости?





ТЕМА 22

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В ТЕХНИКЕ ЗАВИСИМОСТИ ДАВЛЕНИЯ ДВИЖУЩЕГОСЯ ГАЗА И ЖИДКОСТИ ОТ СКОРОСТИ

1. Подъёмная сила крыла самолета.
2. Эффект Магнуса.
3. Расчёт скорости жидкости, выходящей через отверстие в сосуде.



Почему опасно стоять рядом с быстро движущимся поездом?
Поясните свой ответ.

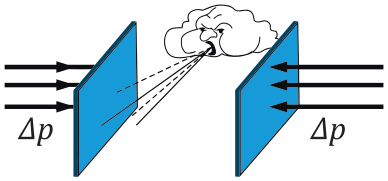


Рис. 3.8

Мы наблюдали, что при движении жидкости по сравнению с состоянием покоя давление изменяется. Это давление зависит от динамического давления. Для наблюдения зависимости динамического давления от скорости жидкости или газа проведём следующий опыт. Возьмем два листа бумаги и зафиксируем их в вертикальном положении. Затем подуем в промежуток между листами (рис. 3.8). Листы начнут приближаться друг к другу. Причиной этого явилось то, что воздух между листами пришел в движение, и давление между ними уменьшилось. Давление с внешней стороны листа будет больше, чем с внутренней, и за счёт этого появится сила, сдавливающая листы.

Иногда корабли, плывущие в одну сторону, сталкиваются без видимых причин. Это явление объясняется появлением разности давления в пространстве между ними.

1. Подъемная сила крыла самолета

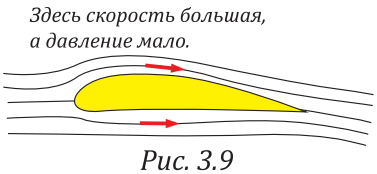


Рис. 3.9

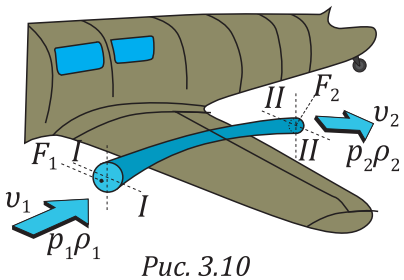


Рис. 3.10

Полёт самолётов зависит от особого строения крыльев (рис. 3.9). Крыло самолёта имеет обтекаемую форму. Встречный ветер разделяется на два потока. Ветровые потоки, проходящие по нижней и верхней сторонам крыла, после прохождения через крыло встречаются одновременно. Поскольку путь, который ветер должен пройти сверху, больше, чем путь снизу, скорость ветра сверху будет иметь большее значение, чем скорость ветра снизу. Согласно уравнению Бернулли, статическое давление воздуха (p_1) меньше на верхней части крыла, а давление (p_2) на нижней части больше. Силы давления $F_1 = p_1S_1$ va $F_2 = p_2S_2$ на нижнюю и верхнюю части крыла имеют разные значения, что создаёт результирующую силу давления, направленную снизу вверх. Это результирующая сила давления:



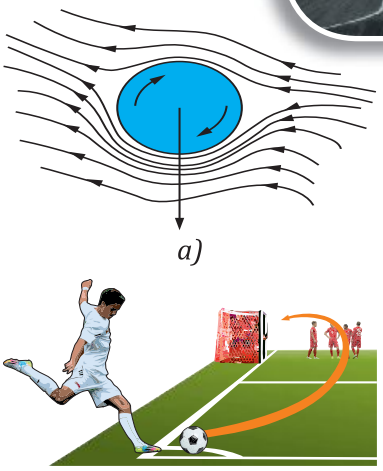
$$F_{под} = p_2 S_2 - p_1 S_1$$

действует как подъёмная сила на самолёт (рис. 3.10).

2. Эффект Магнуса

Многие видели, как футбольный мяч, отправленный с угла поля, по дуге попадает в ворота. Что заставляет мяч поворачиваться? Опытный футболист пинает мяч не по центру, как обычно делают все, а ударяет по его краю. В результате под воздействием такого удара мяч во время движения поворачивается. Кроме того, в результате такого удара меняется скорость течения воздуха с левой и правой сторон мяча, что создает разницу давлений в воздухе, и мяч попадает в ворота (рис. 3.11). Такое явление называется ***эффектом Магнуса.***

В этом случае появляется сила, действующая на объект перпендикулярно потоку. Из-за этого движущееся тело отклоняется в одну сторону. Этот эффект был открыт немецким физиком Генрихом Магнусом в 1853 году.



а) *б)*

Рис. 3.11

3. Расчёт скорости жидкости, выходящей через отверстие в сосуде

Используя уравнение Бернулли, можно вычислить скорость вытекания жидкости из отверстия, находящегося на глубине h от поверхности жидкости (рис. 3.12). Так как площадь отверстия много меньше площади поперечного сечения сосуда, скорость понижения уровня жидкости в сосуде много меньше скорости вытекания жидкости из отверстия. Поэтому мы не учитываем скорость поверхности жидкости. Давление на поверхность жидкости в сосуде равно атмосферному давлению p_0. Давление на выходе жидкости также равно атмосферному давлению p_0. Воспользуемся уравнением Бернулли для этих двух мест, обозначив скорость жидкости, выходящей из щели, через υ. Из формулы

$$p_0 + \rho \frac{\upsilon_1^2}{2} = p_0 + \rho g h$$

получаем: $\upsilon = \sqrt{2gh}$.

Это называется *формулой Торричелли* для идеальной жидкости.



Генрих Густав Магнус (1802–1870)

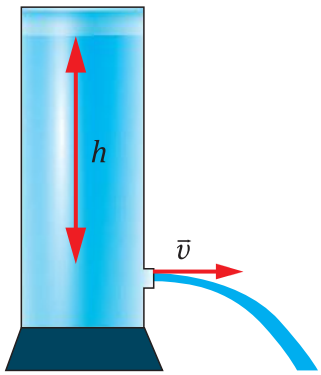


Рис. 3.12



1. Где ещё можно использовать эффект Магнуса?

2. Под действием каких сил поднимается воздушный змей?

3. Зависит ли скорость жидкости, вытекающей из сосуда на рис. 3.12, от площади отверстия?

Проектная работа. Изготовить устройства, работающие на основе движения тела в жидкостях и газах (ученики выполняют самостоятельно).



ТЕМА 23 РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ

Примеры решения задач

1. Найти скорость течения углекислого газа по трубе, если известно, что через поперечное сечение трубы за время $t = 30$ min прошло 500 l газа. Диаметр трубы 2 cm.

Дано:	Формула:	Решение:
$V = 500\ l = 0{,}5\ \text{m}^3$ $D = 2\ \text{cm} = 0{,}02\ \text{m}$ $t = 0{,}5\ \text{h} = 1800\ \text{s}$ $\upsilon = ?$	$V = \pi\frac{D^2 l}{4};\quad \upsilon = \frac{l}{t}$ $l = \frac{4V}{\pi D^2};\quad \upsilon = \frac{4V}{\pi D^2 t}$	$\upsilon = \frac{4 \cdot 0{,}5\ \text{m}^3}{3{,}14 \cdot 4 \cdot 10^{-4}\ \text{m} \cdot 1800\ \text{s}} = 0{,}88\ \frac{\text{m}}{\text{s}}$ **Ответ:** $\upsilon = 0{,}88$ m/s.

2. Найти скорость v течения углекислого газа по трубе, если известно, что через поперечное сечение трубы протекает масса газа $m = 0{,}51$ kg. Плотность газа $\rho = 7{,}5$ kg/m^3. Диаметр трубы 2 cm.

Дано:	Формула:	Решение:
$m = 0{,}51\ \text{kg}$ $\rho = 7{,}5\ \text{kg/m}^3$ $D = 2\ \text{cm} = 0{,}02\ \text{m}$ $t = 0{,}5\ \text{h} = 1800\ \text{s}$ $\upsilon = ?$	$V = \pi\frac{D^2 l}{4} = \frac{m}{\rho};\ \upsilon = \frac{l}{t}$ $l = \frac{4m}{\pi\rho D^2};\quad m = V\rho;$ $\upsilon = \frac{4m}{\pi D^2 \rho t}$	$\upsilon = \frac{4 \cdot 0{,}51\ \text{kg}}{3{,}14 \cdot (0{,}02\ \text{m})^2\ 7{,}5\ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 1800\ \text{s}} = 0{,}12\ \frac{\text{m}}{\text{s}}$ **Ответ:** $\upsilon = 0{,}12$ m/s.

3. В цистерне высотой 5 m, на высоте 50 cm от земли установлен кран. С какой скоростью будет вытекать вода, если открыть кран (рис. 3.12)?

Дано:	Формула:	Решение:
$H = 5\ \text{m}$ $h = 50\ \text{cm} = 0{,}5\ \text{m}$ $\upsilon = ?$	$\upsilon = \sqrt{2g(\text{H} - \text{h})}$	$\upsilon = \sqrt{2 \cdot 10\frac{\text{m}}{\text{s}^2}(5 - 0{,}5)\text{m}} =$ $= \sqrt{20\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 4{,}5\text{m}} \approx 9{,}5\frac{\text{m}}{\text{s}}$ **Ответ:** $\upsilon \approx 9{,}5$ m/s.



Упражнение 18

1. С какой скоростью вода выбрасывается вертикально вверх из отверстия в трубе, если струя воды достигает высоты 1,25 m?

2. Скорость течения воды в узкой части трубы 2 m/s. С какой скоростью течёт вода в части, диаметр которой в два раза больше?



3. Если скорость потока воды в трубе уменьшилась в 1,21 раза, а расход воды не изменился, то как изменилась поверхность поперечного сечения трубы?

4. Вода течёт по горизонтальной трубе переменного сечения. Определите скорость воды в узкой части трубы, диаметр которой в 1,5 раза меньше широкой, если скорость воды в широкой части трубы 20 cm/s.

5. Скорость течения нефти в широкой части горизонтального трубопровода 2 m/s. Определите скорость движения нефти в узкой части трубы, если разность статического давления между широкой и узкой частями трубы составляет 6,65 kPa.

6. Какова подъёмная сила (kN) самолёта с площадью крыла 40 m^2 в горизонтальном полёте, если давление воздуха под крыльями 98 kPa, а над крыльями 97 kPa? ?

7. В какой части реки вода течёт быстрее? На поверхности воды или на определённой глубине реки? Посередине реки или у берега?

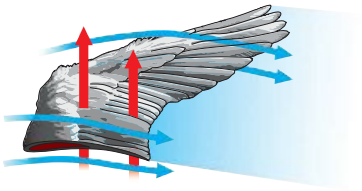
8. В системе подачи воды образовалось отверстие, и вода начала брызгать вверх. Если площадь отверстия равна 4 mm^2, а высота подъёма струи воды составляет 80 cm, определите, сколько воды израсходуется за сутки?

9. Под цистерной высотой 5 m установлен кран. С какой скоростью из неё будет вытекать жидкость, если открыть кран?





ЗАДАНИЯ НА ЛОГИЧЕСКОЕ МЫШЛЕНИЕ ПО ГЛАВЕ



1. Поставьте две свечи рядом, на некотором небольшом расстоянии. Подуйте в промежуток между ними. Пламя свечей наклонится друг к другу. Проведите этот эксперимент и сделайте выводы.

2. Используя картинку, запишите в тетрадь факторы, влияющие на крыло птицы.

ЗАДАЧИ НА САМОСТОЯТЕЛЬНОЕ РЕШЕНИЕ ПО ГЛАВЕ III

1. Труба, по которой течёт вода, имеет разное поперечное сечение с соотношением $S_2 = 5S_1$. Найдите отношение скоростей потока воды в этих течениях.

2. Если скорость течения воды в широкой части трубы 2 m/s, какова будет скорость течения воды в узкой части, диаметр которой в 2 раза меньше (m/s)?

3. Скорость течения воды в трубе 2 m/s. Если каждый час по трубе протекает 7200 kg воды, сколько cm^2 составляет площадь её поперечного сечения?

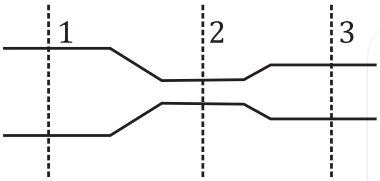


Рис. 3.13

4. Из отверстия в трубе площадью 5 mm^2 вода бьёт вертикально вверх и поднимается на высоту 80 cm. Сколько kg воды вытечет из трубы за 10 часов?

5. Жидкость вытекает из трубы переменного сечения. В каком сечении трубы давление жидкости наименьшее (рис. 3.13)?

6. Как изменилась поверхность поперечного сечения трубы, если расход воды при переходе из одной трубы в другую увеличился в 5,6 раз?

7. Какое давление возникает в результате движения жидкости?

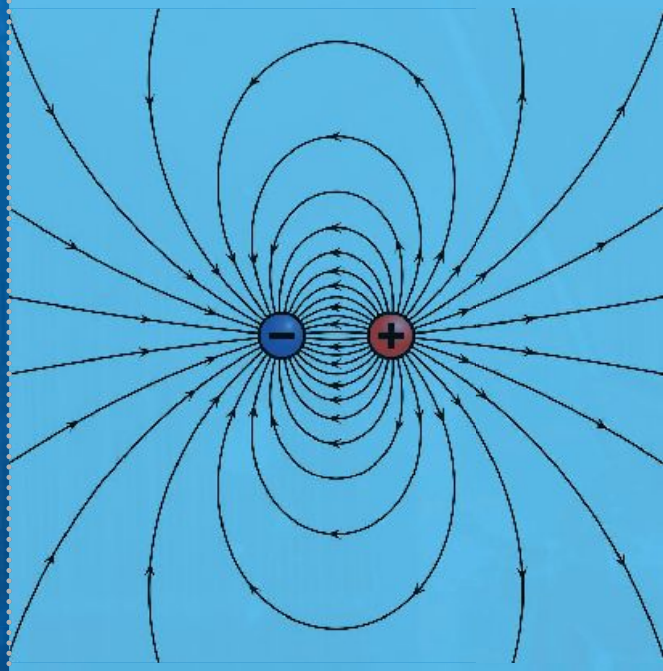
8. Каждую секунду в ёмкость наливают 0,2 *l* воды. Какого диаметра в этом случае должно быть отверстие на дне сосуда, чтобы уровень воды в сосуде оставался неизменным на высоте h = 8,3 cm?

9. Если вода, вытекающая из трубы, наполняет ведро объёмом 10 *l* за 20 s, то сколько воды (*l*) вытечет из трубы за 6 s?

ГЛАВА IV



ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЕ ПОЛЕ



В этой главе вы познакомитесь со следующими темами:

- принцип суперпозиции напряжённости электрического поля;
- электрическое поле заряженного шара;
- работа, выполняемая при перемещении точечного заряда в электростатическом поле;
- потенциальная энергия точечного заряда, находящегося в электрическом поле;
- энергия электрического поля.

ТЕМА 24

ПРИНЦИП СУПЕРПОЗИЦИИ НАПРЯЖЁННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

1. Электростатическое поле.
2. Напряжённость электростатического поля.
3. Принцип суперпозиции электрического поля.
4. Результирующая напряжённость электрического поля.



Как объяснить потрескивание искр при снятии одежды из синтетических материалов?

Если вы надуете воздушный шарик и потрёте его о волосы или синтетическую ткань, вы увидите, как он поднимается вверх. Почему так происходит?

1. Электростатическое поле

Вы узнали о взаимодействии двух зарядов, о том, что их заряды переносятся при соприкосновении друг с другом по закону Кулона. Этот закон означает, что вокруг каждого заряда существует поле, даже если заряды не касаются друг друга на определенном расстоянии. Это поле является электрическим полем. Электрическое поле создается вокруг электрических зарядов.

Электрическое поле, создаваемое вокруг неподвижных зарядов, называется электростатическим полем.

2. Напряжённость электростатического поля

Вы получили общие сведения об электрическом поле в предыдущих классах. Вектор напряжённости электрического поля – $\vec{E}$ вводится как величина, являющаяся силовой характеристикой электрического поля..

Напряжённость электрического поля – силовая характеристика электрического поля, численно равная силе, действующей на единичный положительный заряд (q_s), помещённый в данную точку поля.

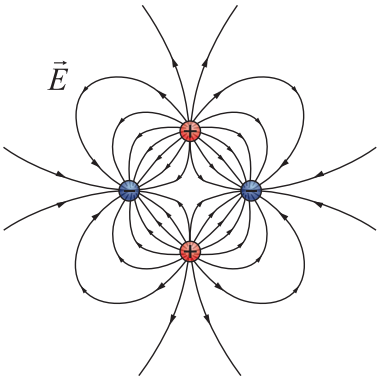


Рис. 4.1 а

То есть:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_s}.$$

Единицей напряжённости электрического поля является

$$[E] = 1\ \frac{\text{N}}{\text{C}}.$$

Направление силы, действующей на положительный заряд, выбрано за направление вектора напряжённости электрического поля. Направление силы, действующей на отрицательный заряд, противоположно направлению вектора напряжённости. Заряды одного знака отталкиваются, заряды разных знаков притягиваются (рис. 4.1 а).

Только половина силовых линий электрического поля от заряда $+2q$ на рис. 4.1 б заканчивается зарядом $-q$. Остальные силовые линии заканчиваются в другом заряде, который предположительно находится в бесконечности. «Картина», образованная силовыми линиями электрического поля, аналогична линиям электрического поля, образованным точечными зарядами. Глядя на «рисунок» этих линий, можно сказать, где поле сильное, где слабое, и определить величину зарядов.

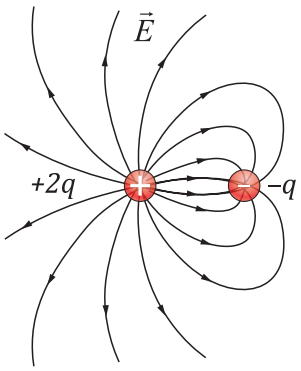


Рис. 4.1 б

3. Принцип суперпозиции электрического поля

Электрическое поле также создаётся одиночным точечным зарядом, но чаще всего – системой зарядов. Если ввести пробный заряд q_s в точку поля, образованного системой зарядов q_1, q_2, ..., q_n, то на неё от каждого заряда действуют силы $\vec{F}_1, \vec{F}_2, ..., \vec{F}_n$. Равнодействующая всех сил, действующих на пробный заряд, равна:

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + ... + \vec{F}_n$$

Тогда напряжённость поля в точке, в которую вводится заряд, будет равна:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_s} = \frac{\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \cdots + \vec{F}_n}{q_s} = \frac{\vec{F}_1}{q_s} + \frac{\vec{F}_2}{q_s} + \cdots + \frac{\vec{F}_n}{q_s} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \cdots + \vec{E}_n$$

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \cdots + \vec{E}_n \qquad (1)$$

Эта формула называется ***принципом суперпозиции электрического поля*** и определяется следующим образом:

Напряжённость электрического поля, создаваемая системой зарядов в точке, равна векторной сумме напряжённостей полей в этой точке от каждого заряда, входящего в систему.

(Словарное значение слова «*суперпозиция*» — соединяться или перекрываться.)

Напряжённость электрического поля точечного заряда находится по следующей формуле:

$$E = k \cdot \frac{|q|}{r^2} \qquad (2)$$

Здесь: $k = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{N}\cdot\text{m}^2}{\text{C}^2}$; ε_0 =8,85·10^{-12} C^2/N·m^2.

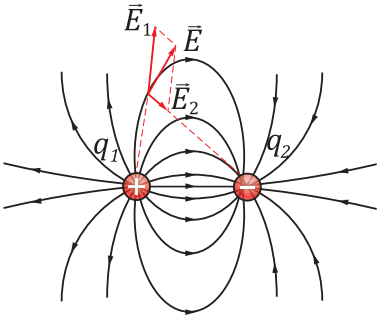


Рис. 4.2

Касательные, проведённые к линиям напряжённости электрического поля, соответствуют напряжённости поля в этой точке (рис. 4.2).

Условие однородности электрического поля сохраняется неизменным независимо от координаты: $\vec{E} = const$.

Если вектор напряжённости одинаков во всех точках, такое поле называется однородным электрическим полем.

4. Результирующая напряжённость электрического поля

Если поле создаётся 2-мя точечными зарядами, то по принципу суперпозиции результирующая напряжённость поля выражается формулой $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$.

Результирующая напряжённость электрического поля находится по следующей формуле:

$$E = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 + 2 \cdot E_1 \cdot E_2 \cdot \cos\alpha} \qquad (3)$$

Здесь: $E_1 = |\vec{E}_1|$; $E_2 = |\vec{E}_2|$; $E = |\vec{E}|$; α – угол между $\vec{E}_1$ и $\vec{E}_2$.

Упрощаем формулу (3) для некоторых собственных значений угла α:

1) $\alpha = 0°$; если векторы напряжённости электрического поля направлены в одну сторону: $E = E_1 + E_2$;

2) $\alpha = \pi/2 = 90°$; если векторы напряжённости электрического поля перпендикулярны друг другу: $E = \sqrt{E_1^2 + E_2^2}$;

3) $\alpha = \pi = 180°$; если векторы напряжённости электрического поля направлены в противоположные стороны: $E = |E_1 - E_2|$.

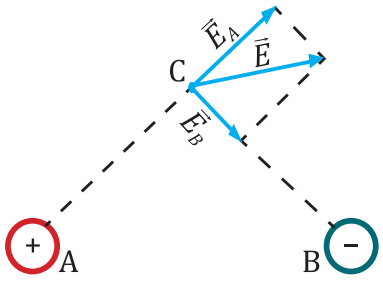
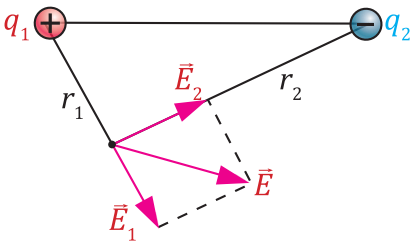


Рис. 4.3

На рис. 4.3 показана результирующая напряжённость электрического поля, создаваемая точечными зарядами *А* и *Б* в точке *С*.

– Если отрицательный заряд вводится в поле положительного заряда или положительный заряд вводится в поле отрицательного заряда, результирующая напряжённость электрического поля увеличивается.

– Если положительный заряд вводится в поле положительного заряда или отрицательный заряд вводится в поле отрицательного заряда, результирующая напряжённость электрического поля уменьшается.



Пример решения задачи

1. Два точечных заряда $q_1 = 6$ nC и $q_2 = -16$ nC находятся в воздухе на расстоянии $r = 5$ cm друг от друга. Определите модуль напряженности электрического поля в точке, расположенной на расстоянии $r_1 = 3$ cm от положительного заряда и $r_2 = 4$ cm от отрицательного заряда.

Дано:	**Формула:**	**Решение:**
$q_1 = 6$ nC $= 6 \cdot 10^{-9}$ C $q_2 = -16$ nC $= -16 \cdot 10^{-9}$ C $r = 5$ cm $= 5 \cdot 10^{-2}$ m $r_1 = 3$ cm $= 3 \cdot 10^{-2}$ m $r_2 = 4$ cm $= 4 \cdot 10^{-2}$ m $k = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2}$	$(r_1)^2 + (r_2)^2 = r^2$ Из этого следует, $\alpha = 90°$ $E_1 = k \cdot \frac{\lvert q_1 \rvert}{r_1^2}$ $E_2 = k \cdot \frac{\lvert q_2 \rvert}{r_2^2}$	$E_1 = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2} \cdot \frac{\lvert 6 \cdot 10^{-9}\ \text{C} \rvert}{9 \cdot 10^{-4}\ \text{m}^2} = 6 \cdot 10^4 \frac{\text{N}}{\text{C}}$ $E_2 = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2} \cdot \frac{\lvert -16 \cdot 10^{-9}\ \text{C} \rvert}{16 \cdot 10^{-4}\ \text{m}^2} = 9 \cdot 10^4 \frac{\text{N}}{\text{C}}$
$E = ?$	$E = \sqrt{E_1^2 + E_2^2}$	$E = \sqrt{(6 \cdot 10^4)^2 + (9 \cdot 10^4)^2} \approx 10{,}8 \cdot 10^4 \frac{\text{N}}{\text{C}} = 108 \frac{\text{kN}}{\text{C}}$ **Ответ:** $E \approx 108 \frac{\text{kN}}{\text{C}}$.

Упражнение 19

1. Определите знак зарядов *K* и *L*. (рис. 4.4).

2. Заряженный шар, подвешенный на невесомой нити, находится в равновесии в постоянном электрическом поле, как показано на рисунке 4.5. Найдите вес мяча. Напряжённость электрического поля 50 N/m, заряд шарика $3 \cdot 10^{-10}$ C. *sin* 37° = 0,6; *cos* 37° = 0,8.

3. Найдите результирующую напряжённость поля в точке *L* на рисунке 4.6. Нарисуйте схему. (рис. 4.6).

4. Определите направление результирующей напряжённости электрического поля в точке *A* точечных зарядов q_1 и q_2 с разными знаками и одинаковой абсолютной величиной. (рис. 4.7).

5. Два точечных заряда с зарядами, равными 2 nC, находятся на расстоянии 1 m друг от друга. Найти напряжённость поля в точке посередине между зарядами.

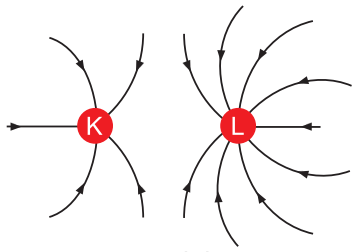


Рис. 4.4

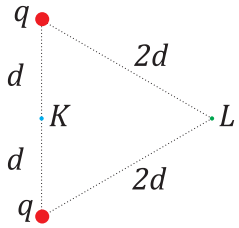


Рис. 4.6

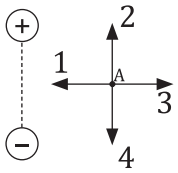


Рис. 4.7

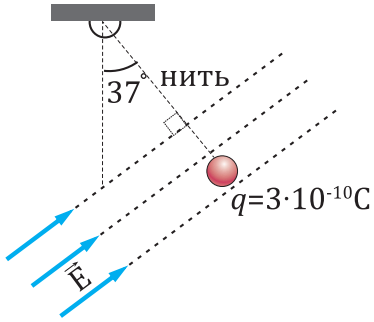


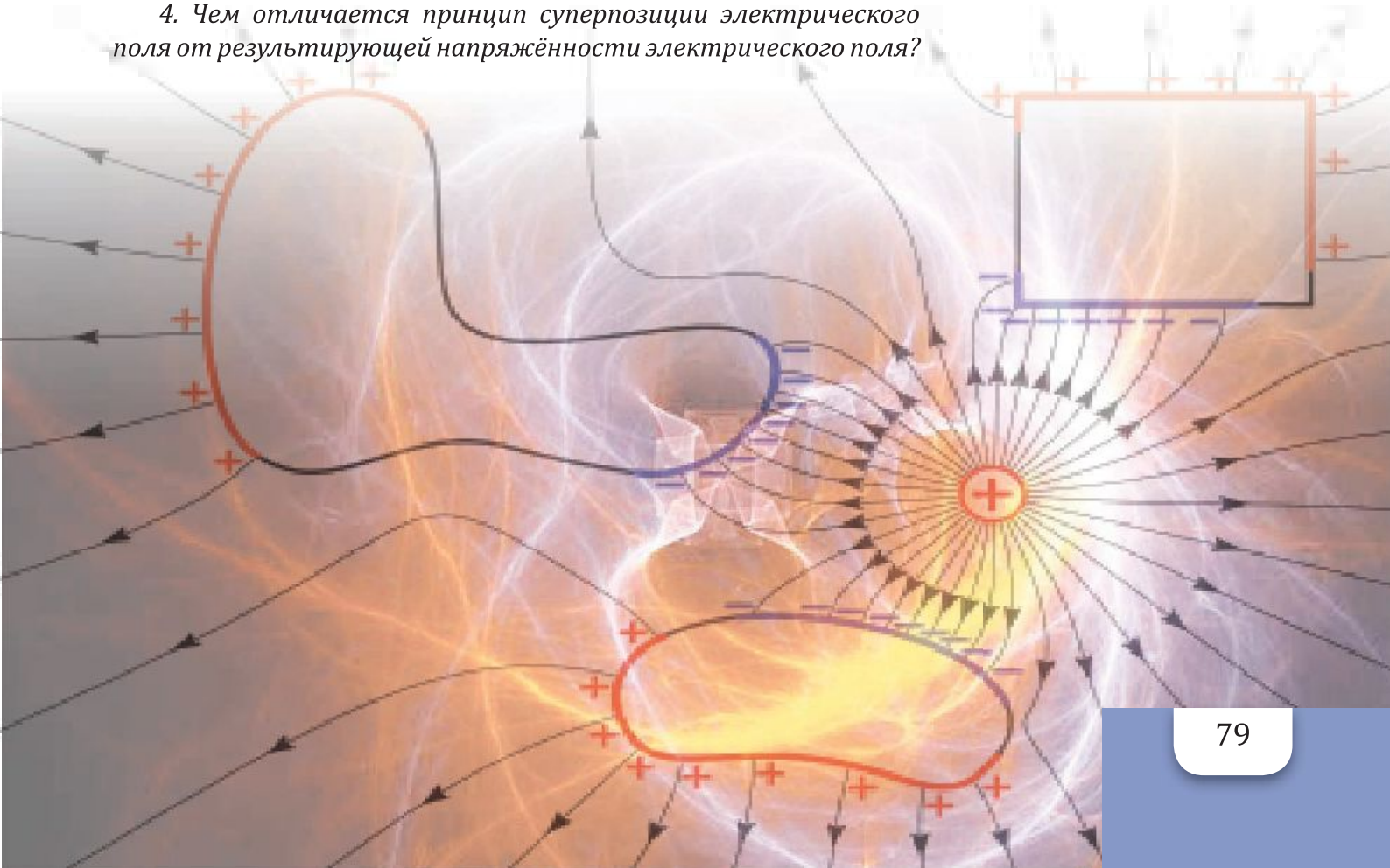
Рис. 4.5

1. *Как создаётся электрическое поле?*

2. *Почему силовые линии электрического поля никогда не пересекаются?*

3. *Может ли существовать электрическое поле в вакууме?*

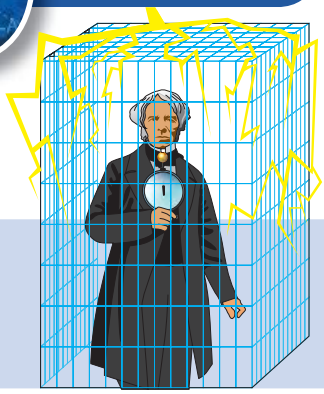
4. *Чем отличается принцип суперпозиции электрического поля от результирующей напряжённости электрического поля?*



ТЕМА 25

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ ЗАРЯЖЁННОГО ШАРА

1. Электрическое поле заряженного металлического шара.
2. Напряжённость поля на расстоянии *x* от поверхности шара или сферы.
3. Поверхностная плотность заряда.
4. Диэлектрическая проницаемость среды.



Почему не раскрылись лепестки электроскопа в руках Фарадея, стоящего в металлической клетке, заряжённой снаружи? Объясните свой ответ.

1. Электрическое поле заряженного металлического шара

Вы узнали о точечном заряде или электрическом поле заряженных частиц внутри прямого проводника. Теперь давайте зарядим шар или сферическое тело и узнаем об электрическом поле вокруг него.

Пусть проводящий шар радиусом r имеет заряд q (рис. 4.8). Определим напряжённость электрического поля, создаваемого таким заряженным шаром (сферой) в его центре, на поверхности и и за пределами шара.

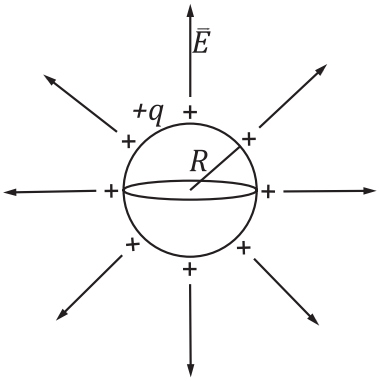


Рис. 4.8

Если шар однородный, то заряд равномерно распределяется по поверхности шара. Поэтому пространственное распределение силовых линий электрического поля вне поверхности сферы такое же, как и распределение силовых линий точечного заряда (рис. 4.9). В этом случае напряжённость электрического поля, создаваемая заряженным шаром и сферой, выражается формулой для напряжённости электрического поля, создаваемой точечным зарядом, то есть:

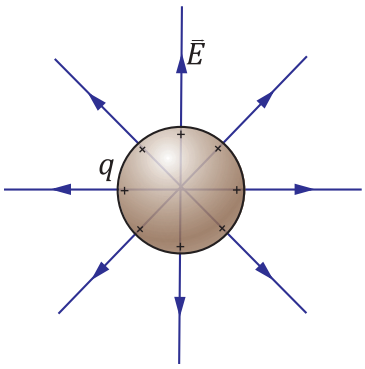


Рис. 4.9

$$E = k \cdot \frac{|q|}{R^2} \qquad (1)$$

2. Напряжённость поля на расстоянии *x* от поверхности шара или сферы

Поскольку заряд, сообщаемый шару или сфере, распределяется только по их поверхности за счёт силы взаимного отталкивания, напряжённость электрического поля внутри них ($r < R$) всегда равна нулю ($E_{\text{внутр}} = 0$). Напряжённость поля в произвольной точке, расположенной вне шара или сферы ($r > R$), такая же, как и у поля точечного заряда q, находящегося в центре шара или сферы, и рассчитывается следующим образом (рис. 4.10):

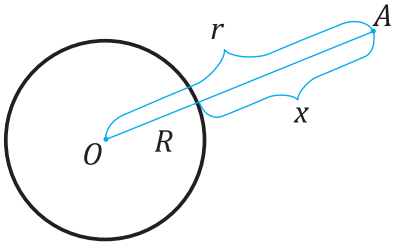


Рис. 4.10

$$E = k \cdot \frac{|q|}{r^2} \qquad r = R+x$$

$$E = k \cdot \frac{|q|}{(R+x)^2} \qquad (2)$$

3. Поверхностная плотность заряда

Если заряд Δq равномерно распределён по поверхности ΔS, то величина, измеряемая количеством заряда, приходящегося на единицу площади этой поверхности, называется поверхностной плотностью заряда. Поверхностная плотность заряда обозначается буквой σ (сигма).

$$\sigma = \frac{\Delta q}{\Delta S} \text{ или } \sigma = \frac{q}{S}. \quad (3)$$

Поверхностная плотность заряда шара или сферы:

$$\sigma = \frac{q}{S} = \frac{q}{4\pi R^2}. \quad (4)$$

За единицу поверхностной плотности заряда в системе СИ принят $Кл/м^2$.

На рисунке 4.11 изображена напряжённость электрического поля, создаваемая равномерно заряжённой бесконечной плоскостью.

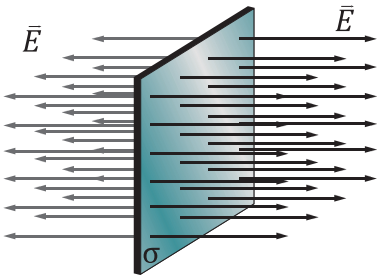


Рис. 4.11

Равномерно заряжённая бесконечная плоскость создаёт однородное электрическое поле, а его напряжённость определяется по формуле:

$$E = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0}, \quad (5)$$

его значение не зависит от расстояния до плоскости, т.е. если поместить пробный заряд q_s на разных расстояниях от равномерно заряжённой плоскости, то величина электрической силы, действующей на него, будет одинакова.

На основании формулы (4) выражаем плоскую положительно заряжённую сферическую поверхность радиуса R через поверхностную плотность σ. Полный заряд на поверхности сферы равен:

$$q = 4\pi R^2 \cdot \sigma.$$

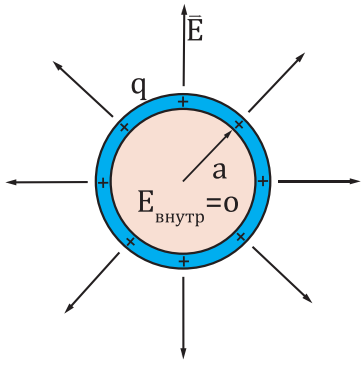


Рис. 4.12

Здесь $S = 4 \cdot \pi \cdot R^2$ – площадь поверхности сферы или шара. Тогда напряжённость электрического поля на поверхности шара равна (рис. 4.12):

$$E = \frac{\sigma \cdot 4\pi R^2}{4\pi R^2 \varepsilon_0}; \quad E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}. \quad (6)$$

Напряжённость электрического поля в точке, находящейся на некотором расстоянии от поверхности шара или сферы, равна:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0} \cdot \frac{R^2}{r^2}. \quad (7)$$

Отсюда видно, что силовые линии электрического поля равномерно заряжённой сферической поверхности расположены вне сферы.

4. Диэлектрическая проницаемость среды

Относительная диэлектрическая проницаемость среды – физическая величина, характеризующая электрические свойства вещества и показывающая, во сколько раз напряжённость электрического поля зарядов в этой среде меньше напряжённости электрического поля в вакууме.

Коэффициент, характеризующий электрическое свойство среды, называется относительной диэлектрической проницаемостью среды и обозначается греческой буквой ε (эпсилон).

Диэлектрическая проницаемость является безразмерной величиной.

Согласно определению, из равенства:

$$\varepsilon = \frac{E_0}{E} \qquad (8)$$

ясно, что напряжённость электрического поля точечного заряда, помещённого в однородный диэлектрик, равна

$$E = \frac{E_0}{\varepsilon}$$

и уменьшается в ε раз. Потому что незаряжённый диэлектрик создаёт внутри себя поле, направленное против внешнего поля. Внутреннее поле, создаваемое в диэлектрике, ослабляет внешнее поле. В этом случае напряжённость поля в точке на расстоянии r от точечного заряда, помещённого внутрь диэлектрика, вычисляется следующим образом:

$$E = k\frac{|q|}{\varepsilon \cdot r^2} \qquad (9)$$

Напряжённость электрического поля шара, находящегося в какой-либо среде, вычисляется с помощью формулы:

$$E = k\frac{|q|}{\varepsilon \cdot R^2}. \qquad (10)$$

Диэлектрическая проницаемость некоторых веществ

№	Вещества	Диэлектрическая проницаемость
1	Воздух	1
2	Вода	81
3	Керосин	2,1
4	Масло	2,5
5	Парафин	2,1
6	Слюда	6
7	Стекло	7



1. Как проверить, что внутри, на поверхности и на некотором расстоянии от поверхности заряжённого металлического шара образуется электрическое поле?

2. Как зависит напряжённость поля шара от поверхностной плотности его заряда?

3. В проводнике какой формы электрический заряд распределяется равномерно?

4. Почему электрическое поле внутри заряжённого шара равно нулю?

5. Как вычисляется электрическое поле на поверхности и вне заряжённой сферы?

Пример решения задачи

Шар радиусом 4 cm находится в некой среде. Напряжённость электрического поля на расстоянии, равном диаметру шара, составляет 123 V/m. Найдите диэлектрическую проницаемость среды, если заряд шара равен 16 nC.

Дано:	Формула:	Решение:
$E = 123$ V/m $q = 16 \cdot 10^{-9}$ C $R = 4$ cm $= 4 \cdot 10^{-2}$ m $r = 3R = 12 \cdot 10^{-2}$ m	$E = k \cdot \frac{\lvert q \rvert}{\varepsilon \cdot r^2}$ $\varepsilon = k \cdot \frac{\lvert q \rvert}{E \cdot r^2}$	$\varepsilon = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2} \cdot \frac{16 \cdot 10^{-9}\,\text{C}}{144 \cdot 10^{-4}\,\text{m}^2 \cdot 123 \frac{\text{V}}{\text{m}}} \approx 81$ **Ответ:** $\varepsilon = 81$.
$E = ?$		

Упражнение 20

1. Металлическому шару радиусом 50 cm передали заряд 5 nC. Найти напряжённость электрического поля вблизи поверхности шара.

2. Как изменится напряжённость электрического поля на поверхности шара, находящегося в керосине, если поверхностную плотность заряда шара уменьшить в 4,2 раза? Относительная диэлектрическая проницаемость керосина равна 2,1.

3. Шар с зарядом q находится внутри заземлённой металлической сферы, но не касается её поверхности. Какова напряжённость электрического поля внутри сферы (E_1) и вне её (E_2)?

4. Найти напряжённость поля шара на расстоянии от поверхности, равном его диаметру, с поверхностной плотностью заряда *s*.

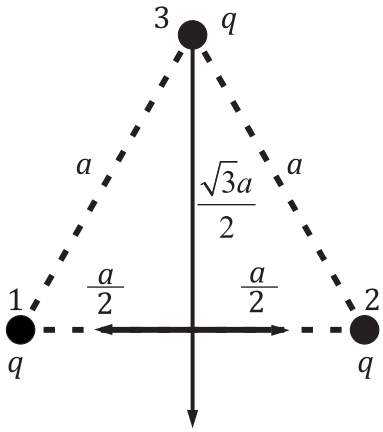
5. Одинаковые точечные заряды *q* размещены на концах квадрата со стороной *a*. Найдите напряжённость электрического поля между центром квадрата и одной из его сторон.

ТЕМА 26

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ

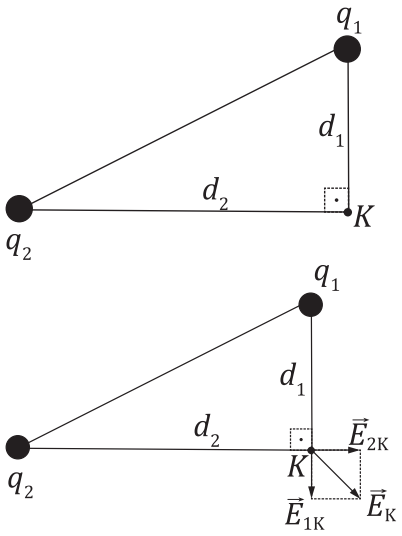
Примеры решения задач

1. В вершинах равностороннего треугольника со стороной a размещены три одинаковых заряда q. Определить напряжённость электрического поля и его направление в середине одной из сторон треугольника.



Дано:	Формула:	Решение:
$q_1 = q_2 = q_3 = q$ $r_1 = r_2 = a/2$	$E = \frac{k \cdot q}{r^2}$	$E_1 = E_2$ $r = \sqrt{a^2 - \frac{a^2}{4}} = \frac{\sqrt{3}a}{2}$ $E = \frac{k \cdot q}{\left(\frac{\sqrt{3}}{2}a\right)^2} = \frac{k \cdot q}{\frac{3 \cdot a^2}{4}} = \frac{4kq}{3a^2}$
$E = ?$	$E = \frac{k \cdot q}{r^2}$;	**Ответ:** $E = \frac{4kq}{3a^2}$

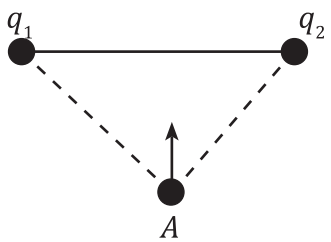
2. Два заряда $3q$ и $16q$ расположены, как показано на рисунке. Найдите напряжённость поля в точке C.



Дано:	Формула:	Решение:
$q_1 = 3q$ $q_2 = +16q$ $d_1 = d$ $d_2 = 2d$	$E_K = \sqrt{E_1^2 + E_2^2}$ $E = k \cdot \frac{q}{d^2}$;	$E_1 = k \cdot \frac{3q}{d^2} = 3E$ $E_2 = k \cdot \frac{16q}{(2d)^2} = k \cdot \frac{16q}{4d^2} = 4E$ $E_K = \sqrt{(3E)^2 + (4E)^2} = \sqrt{25E^2} = 5E$
$E_K = ?$		**Ответ:** $E_K = 5E = \frac{5kq}{d^2}$.

Упражнение 21

1. На приведенном чертеже показан результирующий вектор напряженности поля, созданного зарядами q_1 и q_2 в точке A. Определите знак зарядов q_1 и q_2.

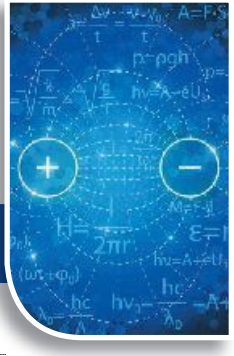


2. Заряды 16 nC и 36 nC находятся на расстоянии 4 cm друг от друга. Определите расстояние между первым зарядом и точкой, где напряжённость электрического поля равна нулю.

3. Определите величину точечного заряда, если напряжённость поля в воде на расстоянии 10 m от него равна 1 N/C.

4. Электрон в воде получил ускорение $1{,}6 \cdot 10^{13}$ m/s^2 под действием однородного электрического поля. Найдите напряжённость электрического поля.

5. Положительно заряженный шар, прикреплённый к вертикальной нити, отклоняется от вертикали вправо в однородном электрическом поле. Определите направление напряжённости электрического поля.

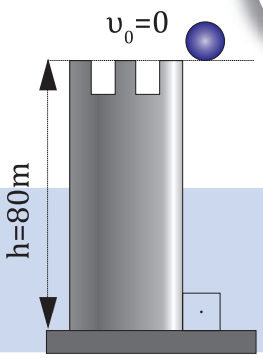


ТЕМА 27

РАБОТА, СОВЕРШАЕМАЯ ПРИ ПЕРЕМЕЩЕНИИ ТОЧЕЧНОГО ЗАРЯДА В ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМ ПОЛЕ

1. Консервативные и неконсервативные силы.

2. Работа, совершаемая при перемещении точечного заряда в электростатическом поле.



Вспомните из курса механики, какой энергией обладает тело при падении с высоты на землю? Как выражается работа в механике?

1. Консервативные и неконсервативные силы

Из курса механики известно, что совершаемая работа представляется произведением силы, действующей на тело, на перемещение тела в направлении этой силы. Здесь сила действия – это силы, которые перемещают тело. Они делятся на две группы: консервативные и неконсервативные.

Если работа, совершаемая силой, не зависит от формы траектории, то это сила называется ***консервативной силой***. Сила тяжести, сила упругости, гравитационная сила, электростатическая сила являются примерами консервативных сил.

Если работа, совершаемая силой, зависит от формы траектории, то это сила называется ***неконсервативной силой***. Примерами неконсервативной силы являются сила трения, вихревые силы в электрическом поле и другие.

2. Работа, совершаемая при перемещении точечного заряда в электростатическом поле

Работа, совершаемая при перемещении точечного заряда в электростатическом поле, такая же, как и работа, совершаемая в гравитационном поле, т. е. при движении предмета, выпущенного с высоты, под действием силы тяжести Земли. При свободном падении тела с высоты изменение её потенциальной энергии равно работе силы тяжести Земли. Работа, совершаемая при перемещении заряда в электрическом поле, аналогична (рис. 4.13).

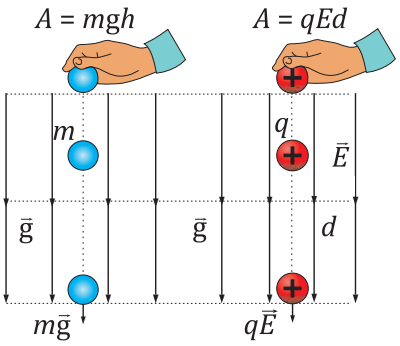


Рис. 4.13

На заряд, помещённый в электрическое поле, действует электростатическая сила со стороны поля. Под действием этой силы заряд движется по направлению электрического поля (при $q>0$) или в противоположном направлении (при $q<0$), и электрическое поле совершает работу. Давайте проясним это. Пусть электрический заряд находится в однородном электрическом поле. Для определения траектории заряда, согласно рис. 4.14, работа, совершаемая электрическим полем при перемещении заряда в нём из точки 1 в точку 2 вдоль горизонтальной оси под действием силы $\vec{F} = q \cdot \vec{E}$, вычисляется как:

$$A=F\cdot l\cdot\cos\alpha = q\cdot E\cdot\Delta d; \quad \Delta d = l\cdot\cos\alpha.$$

Работа, совершаемая между точками (1-2-3) на рис. 4.14, равна:

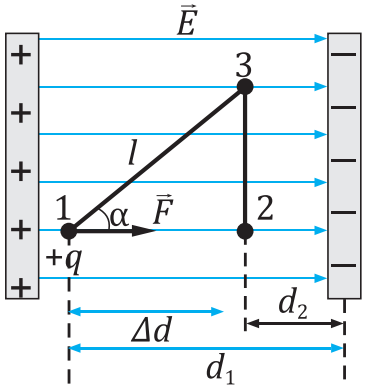


Рис. 4.14



$$A_{1\text{-}2} = q{\cdot}E{\cdot}\Delta d;\ cos\alpha = 1;\quad A_{2\text{-}3} = 0;\ (cos\alpha = 0)$$
$$A_{1\text{-}2\text{-}3} = A_{1\text{-}2} + A_{2\text{-}3} = q{\cdot}E{\cdot}\Delta d;\quad A_{2\text{-}1} = -q{\cdot}E{\cdot}\Delta d;\ (cos\alpha = -1)$$
$$A_{1\text{-}2\text{-}3\text{-}1} = 0\ \text{J},$$

где Δd – перемещение заряда в направлении поля.

Отсюда можно сделать следующий вывод:

Работа, совершаемая при движении точечного заряда в однородном электрическом поле, не зависит от формы траектории заряда, а определяется только начальным и конечным положениями заряда по направлению поля. Этот вывод уместен для любых электростатических полей.

Поле действия консервативных сил проявляет себя как потенциальное поле. Поэтому работа, совершаемая при перемещении заряда по замкнутому контуру в электростатическом поле, всегда равна нулю. Сила электростатического поля, действующая на точечный заряд, является консервативной силой, как и сила гравитации.

1. В чём сходство работы, совершаемой в гравитационном и электростатическом полях?

2. Как связана работа при перемещении точечного заряда в электростатическом поле с формой траектории?

3. Почему электростатическое поле является консервативной силой?

Пример решения задачи

Когда частица с зарядом 100 μC переместилась на 4 cm в однородном электрическом поле с напряжённостью поля 4 kN/C, электростатическое поле совершило работу 8 mJ. Найдите угол между силовыми линиями и вектором перемещения.

Дано:	Формула:	Решение:
$q = 100\ \mu C = 100 \cdot 10^{-6}\ C$ $E = 4\ kV/m = 4 \cdot 10^{3}\ V/m$ $S = 4\ cm = 4 \cdot 10^{-2}\ m$ $A = 8\ mJ = 8 \cdot 10^{-3}\ J$ $\alpha = ?$	$A = q{\cdot}E{\cdot}S{\cdot}cos\alpha$ $\cos\alpha = \frac{A}{q \cdot E \cdot S}$	$\cos\alpha = \frac{8{\cdot}10^{-3}\ J}{10^{-4}\ C{\cdot}4{\cdot}10^{-2}\ m \cdot 4{\cdot}10^{3}\ \frac{V}{m}} = \frac{1}{2}$ $\alpha = 60°$ **Ответ:** $\alpha = 60°$.

Упражнение 22

1. Найти напряжённость электрического поля в центре отрезка, соединяющего два точечных заряда 8 nC и –6 nC. Расстояние между зарядами 10 cm, $\varepsilon = 1$.

2. Два точечных заряда, равных 2 nC, находятся на расстоянии 1 m друг от друга. Определить напряжённость поля в центре расстояния между зарядами (V/m).

3. Металлический шарик радиусом 6 cm заряжен до 24 nC. Чему равно напряжение (kV/m) в точке на расстоянии 24 cm от центра шара?

ТЕМА 28

ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ ТОЧЕЧНОГО ЗАРЯДА, НАХОДЯЩЕГОСЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

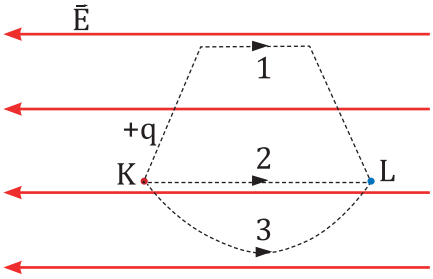
1. Потенциальная энергия точечного заряда, находящегося в электрическом поле.
2. Потенциал поля точечного заряда.
3. Разность потенциалов.
4. Эквипотенциальные поверхности.



Высоковольтные трансформаторы (10 000 V и более) в целях безопасности обнесены забором из металлической сетки.
Вопрос: Какова цель этого защитного барьера и для предотвращения каких опасных событий он предназначен?

1. Потенциальная энергия точечного заряда, находящегося в электрическом поле

Введению пробного заряда в электрическое поле противодействует электрическое поле основного заряда. Соответственно, основной заряд действует против сил электрического поля.



За счёт работы, совершаемой электрическим полем, потенциальная энергия заряда уменьшается. Поэтому работа, совершаемая по перемещению заряда q_0 из одной точки в другую в электрическом поле, равна разности потенциальных энергий зарядов в этих точках, т.е.:

$$A_{1.2} = -\Delta W_p = -(W_{p2} - W_{p1}) = (W_{p1} - W_{p2}) \quad (1)$$

Гравитационная потенциальная энергия и электрическая потенциальная энергия очень похожи. Потенциальная энергия взаимодействия зарядов q_1 и q_2:

$$W = k\frac{q_1 q_2}{r} \quad (2)$$

Работа, совершаемая при перемещении заряда q_0, находящегося на расстоянии r_1 от заряда q, на расстояние r_2, находится следующим образом:

$$A = k\frac{qq_0}{r_1} - k\frac{qq_0}{r_2} \quad (3)$$

2. Потенциал поля точечного заряда

Другой физической величиной, описывающей электрическое поле, является потенциал поля. Знакомясь с этим понятием, используем тот факт, что электрическое поле имеет энергетическую природу. Энергия взаимодействия введённого в электрическое поле заряда с полем зависит не только от поля, но и от величины введённого заряда.

Потенциальные энергии разных пробных зарядов, находящихся в заданной точке электрического поля, также различны, но отношение потенциальной энергии к пробному заряду является неизменной физической величиной для одной и той же точки поля. Эта физическая величина называется потенциалом и обозначается буквой φ. То есть:

$$W_p = \varphi \cdot q_0$$

Исходя из этого, потенциал электрического поля можно определить следующим образом:

Потенциал в какой-то точке электрического поля – физическая величина, численно равная потенциальной энергии единичного положительного пробного заряда, введённого в эту точку поля.

То есть:

$$\varphi = \frac{W_p}{q_0} \quad (4)$$

Потенциал в точке поля, образованного точечным зарядом q, определяется по следующей формуле:

$$\varphi = k \cdot \frac{q}{r} \quad (5)$$

3. Разность потенциалов

И энергия, и заряд являются скалярными величинами, поэтому потенциал также является скалярной величиной. Согласно формулам (3) и (4), работа, совершаемая при перемещении заряда q_0 в электростатическом поле, выражается следующим образом:

$$A = W_1 - W_2 = q_0 \cdot \left(k \cdot \frac{q}{r_1} - k \cdot \frac{q}{r_2}\right) = q_0 \cdot (\varphi_1 - \varphi_2) \quad (6)$$

Отсюда разность потенциалов между двумя точками электрического поля будет равна:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \Delta\varphi = \frac{A}{q_0} \quad (7)$$

На основании формулы (7) разность потенциалов можно описать следующим образом:

Физическая величина, количественно равная работе, совершаемой при перемещении единичного положительного заряда из одной точки поля в другую, называется разностью потенциалов между двумя точками электрического поля.

Единица разности потенциалов также выражается в вольтах (V), как и потенциал. Из этого следует, что $[\Delta\varphi] = \frac{[W]}{[q_0]}$ $1\ \mathrm{V} = \frac{1\mathrm{J}}{1\mathrm{C}}$.

Если электрическое поле создаётся не одним, а системой нескольких зарядов, то потенциал в точке результирующего поля равен алгебраической сумме потенциалов полей, независимо создаваемых зарядами:

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \cdots + \varphi_n$$

Это соотношение выражает принцип суперпозиции полей.

4. Эквипотенциальные поверхности

Точки, находящиеся на одинаковом расстоянии от точечного заряда, имеют равные потенциалы. Если соединить все эти точки, то полученная поверхность называется ***эквипотенциальной поверхностью***.

Геометрическое расположение точек с одинаковым потенциалом называют эквипотенциальной поверхностью.

Эквипотенциальные поверхности поля, создаваемого точечным зарядом, состоят из концентрических сфер, центр которых находится в заряде, и в любой его точке силовые линии электрического поля направлены перпендикулярно этим сферам (рис. 4.15).

Связь между напряжённостью электрического поля и разностью потенциалов выглядит следующим образом:

$$E = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{d}.$$

Здесь d – расстояние между точками с потенциалами φ_1 и φ_2. Отсюда следует, что единицей напряжённости поля является [V/m].

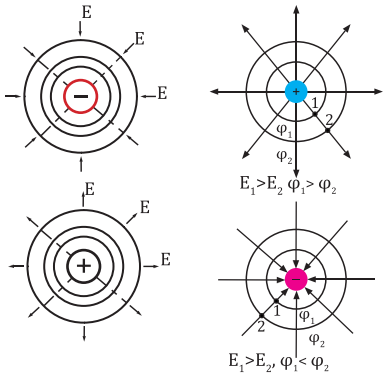


Рис. 4.15

1. Запишите связь между работой, совершаемой электростатической силой, и потенциальной энергией заряда, движущегося в электрическом поле.

2. Как определяется потенциальная энергия заряда, находящегося в электрическом поле?

3. Имеет ли смысл потенциальная энергия, если силы электростатического поля не консервативны?

Пример решения задачи

Металлический шар радиусом 5 cm, находящийся в воздухе, имеет заряд 30 nC. Определите потенциал поля в точке на расстоянии 2 cm от центра заряженного шара, на поверхности шара и в точке на расстоянии 5 cm от поверхности шара.

Дано:	**Формула:**	**Решение:**
$q = 30\ \text{nC} = 30 \cdot 10^{-9}\ \text{C}$ $r = 5\ \text{cm} = 5 \cdot 10^{-2}\ \text{m}$ $r_1 = 2\ \text{cm} = 2 \cdot 10^{-2}\ \text{m}$ $r_2 = 5\ \text{cm} = 5 \cdot 10^{-2}\ \text{m}$ $k = 9 \cdot 10^9\ \text{N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$	$\varphi_{внутри} = \varphi_{на\ поверхности} = k \cdot \frac{q}{r}$ $\varphi_{снаружи} = k \cdot \frac{q}{r + r_2}$	$\varphi_{внутри} = \varphi_{на\ поверхности} = 9 \cdot 10^9\ \text{N} \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{C}^2} \cdot \frac{30 \cdot 10^{-9}\ \text{C}}{5 \cdot 10^{-2}\ \text{m}} = 5400\ \text{V}$ $\varphi_{снаружи} = 9 \cdot 10^9\ \text{N} \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{C}^2} \cdot \frac{30 \cdot 10^{-9}\ \text{C}}{\left(5 \cdot 10^{-2} + 5 \cdot 10^{-2}\right)\ \text{m}} = 2700\ \text{V}$
$\varphi_{внутри}$ – ? $\varphi_{на\ поверхности}$ – ? $\varphi_{снаружи}$ – ?		**Ответ:** 5400 V; 2700 V.

Упражнение 23

1. Найдите потенциал электрического поля на расстоянии $5{,}3 \cdot 10^{-11}$ m от протона. Найдите потенциальную энергию электрона на таком же расстоянии от протона.

2. Шар массой 1 g был перемещён из точки A с потенциалом 600 V в точку B с нулевым потенциалом. Определите скорость шара в точке B, если его заряд 10 nC, а скорость в точке A 20 cm/s.

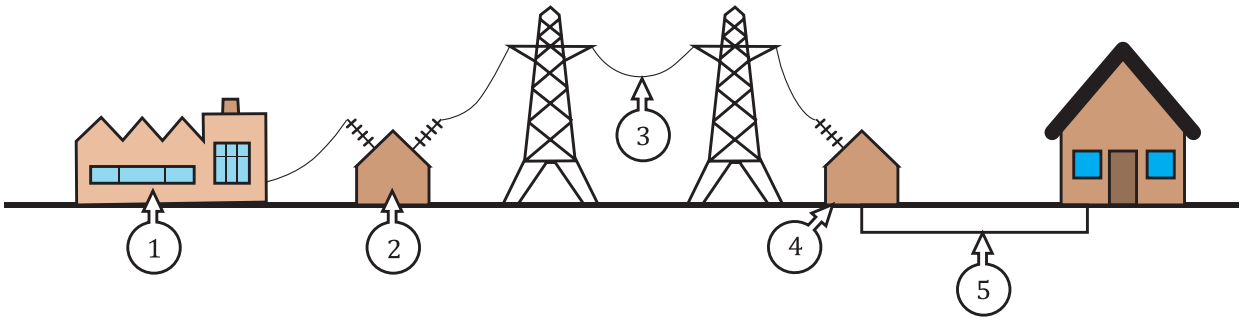
3. Металлический шарик диаметром 2 cm заряжен до потенциала –150 V. Найдите количество избыточных электронов на поверхности шара.

4. Два шара с зарядами 20/3 nC и 40/3 nC находятся на расстоянии 40 cm друг от друга. Какую работу надо совершить, чтобы сблизить их на 25 cm?

5. На какое минимальное расстояние может приблизиться шарик массой 40 mg и зарядом 1 nC, движущийся со скоростью 10 cm/s, к точечному заряду, равному 4 nC?

Дополнительные задания

1. На рисунке процессы от выработки электроэнергии до поступления к потребителям отмечены цифрами 1, 2, 3, 4 и 5. Объясните их обязанности.



2. Электровоз движется с помощью электричества, поступающего от воздушных кабелей, питаемых переменным током. Рассчитайте ток, протекающий в двигателе локомотива, если максимальная скорость локомотива 140 km/h, а мощность двигателя 4,7 MW. Напряжение в кабелях равно 25 kW.

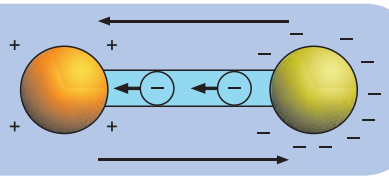


ЭНЕРГИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

ТЕМА 29

1. Энергия электрического поля.
2. Энергия электрического поля конденсатора.
3. Плотность энергии электрического поля

Что произойдёт, если эти заряженные шары соединить проводом? Обоснуйте свой ответ.



1. Энергия электрического поля

Как утверждалось в предыдущих темах, чтобы зарядить проводник, нужно совершить работу по преодолению взаимного отталкивания между зарядами. За счёт этой работы любой заряженный проводник будет иметь определенную энергию. Во время разрядки проводник расходует эту энергию. Количественно энергия, полученная заряженным проводником ($W_{эл}$ – это энергия называется энергией электрического поля), равна работе, совершаемой при его зарядке, т. е.:

$$W_{эл} = A$$

Как вычисляется работа, совершаемая при зарядке проводника? Если тело изначально не заряжено, его потенциал равен нулю. Если передать ему заряд q, его потенциал изменяется от нуля до φ. Количество работы, выполненной при зарядке проводника, равно площади, указанной на рис. 4.16. Работа, совершаемая при зарядке тела, равна:

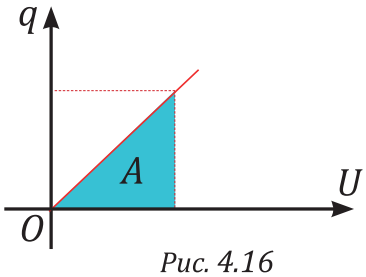


Рис. 4.16

$$A = q \cdot \varphi_{ср} \qquad (1)$$

Среднее значение потенциала тела равно среднему арифметическому его начального и конечного значений, то есть:

$$\varphi_{ср} = \frac{0+\varphi}{2} = \frac{\varphi}{2} \qquad (2)$$

Подставляем значение $\varphi_{ср}$ в уравнение (1) и получим следующую формулу:

$$A = \frac{q \cdot \varphi}{2} \qquad (3)$$

Итак, работа, совершаемая при зарядке тела, равна половине произведения его заряда на его потенциал.

Энергия электрического поля одиночного проводника

Согласно соотношениям $A = W_{эл}$ запишем энергию электрического поля одиночного проводника следующим образом:

$$W_{эл} = \frac{q \cdot \varphi}{2} = \frac{C \cdot \varphi^2}{2} = \frac{q^2}{2C} \qquad (4)$$

2. Энергия электрического поля конденсатора

Если заряженное тело состоит из конденсатора, то при вычислении энергии его электрического поля ($W_{эл}$) количество заряда в формуле (4) следует заменить на заряд конденсатора, а его потенциал на разность потенциалов между его обкладками, т.е., поскольку:

$$W_{эл} = \frac{q\cdot(\varphi_1 - \varphi_2)}{2} = \frac{C\cdot(\varphi_1 - \varphi_2)^2}{2} = \frac{q^2}{2C}, \qquad (5)$$

формулу энергии электрического поля заряженного конденсатора можно записать в виде

$$W_{эл} = \frac{q\cdot U}{2} = \frac{C\cdot U^2}{2} = \frac{q^2}{2C}. \qquad (6)$$

Энергия заряженного тела сконцентрирована в электрическом поле, создаваемом вокруг него, а величина энергии зависит от размеров пространства, в котором распространяется электрическое поле, и напряжённости поля. Рассмотрим, в частности, заряженный плоский конденсатор. Электрическое поле, создаваемое зарядами на плоских обкладках конденсатора, заключено между его обкладками. Выразим объём между обкладками конденсатора по формуле $V=S\cdot d$.

Ёмкость заряжённого плоского конденсатора $C = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot S}{d}$ и связь между напряженностью поля конденсатора и разностью потенциалов между обкладками, и по формуле (6), получаем следующее:

$$W = \frac{C\cdot U^2}{2} = \frac{\varepsilon_0\cdot\varepsilon\cdot S\cdot d^2\cdot E^2}{2d} = \frac{\varepsilon_0\cdot\varepsilon\cdot E^2}{2}\cdot V \qquad (7)$$

Энергия заряженного плоского конденсатора прямо пропорциональна квадрату напряжённости создаваемого им электрического поля и объёму пространства, занимаемому этим полем.

3. Плотность энергии электрического поля

Энергия поля в единице объёма называется плотностью энергии. Согласно определению:

$$\omega = \frac{W}{V} = \frac{\varepsilon_0\cdot\varepsilon\cdot E^2}{2V}\cdot V = \frac{\varepsilon_0\cdot\varepsilon\cdot E^2}{2} \qquad (8)$$

Каждый конденсатор, кроме накопления заряда, также имеет свойство накапливать энергию электрического поля. Эта энергия не может храниться в конденсаторе в течение длительного времени. Конденсатор со временем разряжается между пластинами.

1. От каких величин зависит электрическая энергия заряженного тела?

2. Какая работа совершается при зарядке конденсатора?

3. Где хранится энергия заряженного конденсатора?

Пример решения задачи

Плоский воздушный конденсатор имеет ёмкость 0,1 μF и разность потенциалов 200 V. Вычислите энергию электрического поля в конденсаторе.

Дано:	**Формула:**	**Решение:**
$C = 0{,}1\ \mu F = 1 \cdot 10^{-7}\ F$ $\varphi_2 - \varphi_1 = 200\ V$ $W = ?$	$W = \frac{C \cdot (\varphi_2 - \varphi_1)^2}{2}$	$W = \frac{10^{-7}\ F \cdot 4 \cdot 10^4\ V}{2} = 2 \cdot 10^{-3} = 2\ mJ$ **Ответ:** 2 mJ.

Упражнение 24

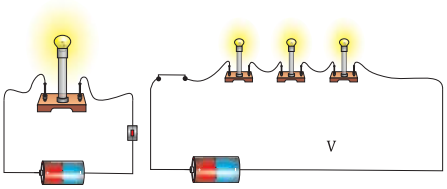
1. Заряженная пылинка массой 10^{-8} g подвешена в однородном электростатическом поле между двумя параллельными пластинами с разностью потенциалов 5 kV. Найдите заряд частицы, если расстояние между пластинами равно 5 cm.

2. Точечный заряд 2 nC вблизи бесконечно заряженной плоскости смещается на 2 cm вдоль силовых линий под действием поля. При этом электрическое поле совершило работу 5 μJ. Найдите поверхностную плотность заряда в плоскости.

3. Шарик массой 40 mg с положительным зарядом 1 nC движется со скоростью 10 cm/s. На какое минимальное расстояние этот шарик может приблизиться к точечному заряду, равному 8 nC?

4. Найдите потенциал φ большой капли ртути, образованной соединением 64 одинаковых сферических капель ртути, каждая из которых заряжена до $\varphi_0 = 25$ V.

Дополнительные задания



а) *б*)

1. Если к лампочке на рисунке *а* последовательно присоединить ещё две лампочки того же типа, то получится подключение, как на рисунке *б*. Как изменится яркость первой лампочки? Обоснуйте свой ответ.



2. За счёт чего горит лампочка, присоединённая проводами к устройству, подключённому к колёсам велосипеда (динамо)? Изменится ли яркость лампочки, если велосипед начнёт двигаться быстрее? Обоснуйте свой ответ.

ТЕМА 30

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ
ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЭНЕРГИИ ИЗ ОДНОГО ВИДА В ДРУГОЙ













Правила безопасности:

– Будьте осторожны во время электропайки.

– Будьте осторожны в процессе склеивания.

Цель урока: изучить закон сохранения и превращения энергии.

Необходимое оборудование: 2 деревянных бруска (один является основанием и имеет размеры 25x5x2 cm, вместо другого можно использовать линейку), 2 DVD-диска, 2 крышки от пластиковых контейнеров (баклажек), 2 болта – гайки и шайбы, верхняя пластиковая часть ручки, электродвигатель 1 шт., светодиод, термоклей, электропаяльник, картон.

Порядок выполнения работы:

1. Отметьте точку на расстоянии 5 cm от одной стороны линейки и просверлите отверстие для болта.
2. Прикрепите линейку к деревянному бруску с помощью клея.
3. Вырежьте из картона форму диска и вклейте его между двумя дисками (диаметр диска, вырезанного из картона, должен быть меньше диаметра DVD-диска).
4. К середине внешней стороны обоих дисков приклейте крышку от пластикового контейнера.
5. Просверлите отверстие в центре крышки и прикрепите её к линейке с помощью болта и гайки.
6. Просверлите диск в произвольном месте и закрепите вторым болтом-гайкой. Поместите пластиковую часть ручки на свободную часть болта и закрепите её гайкой (так, чтобы пластиковая часть могла легко вращаться вокруг болта).
7. Приклейте электродвигатель к другой стороне деревянного бруска.
8. Соединительными проводами подключите светодиод к двум полюсам электродвигателя с помощью электропаяльника.
9. Наденьте одну сторону резинового кольца на шкив электродвигателя, а другую сторону на картонный диск между дисками.
10. Возьмитесь за пластиковую часть ручки и начните вращать её вместе с болтом.
11. Понаблюдайте за загоранием прикреплённого к двигателю светодиода при вращении дисков и сделайте вывод.



1. Какой ещё практический опыт вы можете использовать для демонстрации превращения энергии из одной формы в другую?

2. За каким процессом преобразования одного вида энергии в другой вы наблюдали?

3. Какое оборудование в данном практическом занятии можно заменить другим?

4. Какая энергия была преобразована и в какую в проведённом опыте?

Пример решения задачи

1. Шарик массой 10 g перемещают из точки A с потенциалом 100 V в точку B с нулевым потенциалом. Заряд шарика 10 nC, скорость в точке A 2 cm/s. Определите скорость мяча в точке $Б$.

Дано:	Формула:	Решение:
$m = 10\ \text{g} = 10^{-2}\ \text{kg}$ $\varphi_A = 100\ \text{V}$ $\varphi_B = 0$ $q = 10^{-8}\ \text{C}$ $\upsilon_A = 2 \cdot 10^{-2}\ \text{m/s}$	$A = q\,(\varphi_A - \varphi_B)$ $\Delta E_К = \frac{m\upsilon_A^2}{2} - \frac{m\upsilon_B^2}{2}$	Заряженный шарик перемещается под действием силы электрического поля. Работа, совершаемая при перемещении шарика, равна изменению кинетической энергии шарика, т.е: $A = \Delta E_К$. Если использовать соотношения $A = q(\varphi_A - \varphi_B)$ и $\Delta E_К = \frac{m\upsilon_A^2}{2} - \frac{m\upsilon_B^2}{2}$ скорость в точке B примет следующий вид:
$\upsilon_B = ?$		$\upsilon_B = \sqrt{\upsilon_A^2 - \frac{2q(\varphi_A - \varphi_B)}{m}}$; $\upsilon_B = \sqrt{4 \cdot 10^{-4} - \frac{2 \cdot 10^{-8}(100-0)}{10^{-2}}} \approx 1{,}4\ \text{cm/s}.$ **Ответ:** $\upsilon_B \approx 1{,}4\ \text{cm/s}$.

Упражнение 25

1. Мыльный пузырь с зарядом $2{,}22 \cdot 10^{-10}$ C подвешен в области горизонтального плоского конденсатора. Масса пузырька 0,01 g, расстояние между пластинами 5 cm. Определите разность потенциалов между обкладками конденсатора.

2. Поверхностная плотность шара, заряженного до потенциала 792 V, равна $3{,}33 \cdot 10^{-7}\ \text{C/m}^2$. Определите радиус шара.

3. Под действием электрического поля электрон двигался и увеличивал свою скорость с $\upsilon_1 = 10$ Mm/c до $\upsilon_2 = 30$ Mm/s. Найдите разность потенциалов $\varphi_1 - \varphi_2$ между начальной и конечной точками перемещения. Масса электрона $m_э = 9{,}1 \cdot 10^{-31}$ kg, а его заряд $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C.

4. Определите ёмкость плоского воздушного конденсатора, площадь пластин которого равна 1 m^2, а расстояние между ними 1,5 mm.

5. Определите электроёмкость земного шара. Примем радиус Земли равный 6400 km.

ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ ПО ГЛАВЕ IV

1. Найдите электрические ёмкости C_1 и C_2 изолированного металлического шара радиусом 20 cm, находящегося в вакууме ($\varepsilon_1 = 1$) и погружённого в воду ($\varepsilon_2 = 81$).

2. Заряды –16 nC и 36 nC находятся на расстоянии 10 cm друг от друга. На каком расстоянии от второго заряда находится точка, в которой напряжённость поля равна нулю?

3. Два точечных заряда -4 nC и 4 nC расположены на двух концах правильного треугольника со сторонами 10 cm. Найдите напряжённость электрического поля на третьей вершине треугольника.

4. Определите величину точечного заряда, если поле совершило работу 5 μJ при его перемещении между двумя точками с разностью потенциалов 100 V.

5. Заряд 50 nC в точке электростатического поля имеет потенциальную энергию 7,5 μJ. Найдите потенциал электрического поля в этой точке.

6. Два точечных заряда 0,4 μC и -0,6 μC находятся на расстоянии 12 cm друг от друга. Найдите потенциал электрического поля в центре отрезка, соединяющего заряды.

7. Два точечных заряда с зарядами по 3 nC находятся в воздухе на расстоянии 50 cm друг от друга. Найдите работу, которую нужно совершить, чтобы приблизить их до расстояния 20 cm.

8. Определите напряжённость поля между двумя заряженными параллельными пластинами, если расстояние между ними 12 cm, а разность потенциалов 180 V.

9. Найдите разность потенциалов, если расстояние между двумя точками в однородном электрическом поле напряжённостью 6000 V/м равно 2 cm.

10. Найдите энергию электрического поля в плоском конденсаторе, если напряжение между его обкладками 150 V, а заряд 80 μC.

11. При подаче на плоский конденсатор заряда 40 μC его энергия равнялась 20 μJ. Найдите напряжение на обкладках конденсатора.

12. Найдите плотность энергии электрического поля в среде с диэлектрической проницаемостью 4 и напряжённостью $3 \cdot 10^3$ V/m. Диэлектрическая проницаемость среды равна 4.

13. Каково ускорение электрона, движущегося в электрическом поле напряжённостью 27,3 kV/m (m/s^2)?

14. Металлический шар радиусом 6 см заряжен до 24 nC. Найдите напряжение (kV/m) в 3 cm от центра шара и 4 cm от его поверхности.

ГЛАВА V



ЗАКОНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

В этой главе вы изучите следующие темы:

- сила тока и плотность тока;
- закон Ома для полной цепи;
- скорость упорядоченного движения электронов в металлах;
- зависимость сопротивления металлических проводников от температуры.



ТЕМА 32

СИЛА ТОКА И ПЛОТНОСТЬ ТОКА

1. Сила тока и единица её измерения.
2. Плотность тока и единица её измерения.
3. Значение плотности тока в промышленности и технике.



1. Расскажите про условия возникновения электрического тока.
2. Приведите примеры гальванических элементов и аккумуляторов, используемых в быту.
3. Какие из электрических приборов, которые вы используете в своём доме, работают на постоянном токе, а какие на переменном?

1. Сила тока и единица её измерения

Трудно представить нашу повседневную жизнь без электричества. Утром мы включаем свет, гладим одежду утюгом, достаем продукты из холодильника и разогреваем их в микроволновой печи, заряжаем мобильные устройства и ноутбуки, в школе звенит звонок на урок и перемену, мы учимся в освещённых кабинетах. В настоящее время во всём мире растёт спрос на электромобили. Если обратить внимание, всё вышеперечисленное работает на электричестве.



Электрический ток состоит из упорядоченного потока заряженных частиц, таких как электроны или ионы, движущихся в металлах, электролитах, полупроводниках, газах и вакууме.

Свободно движущиеся заряженные частицы называются носителями заряда. В разных средах электрический ток переносят разные частицы: свободные электроны в металлах, свободные электроны и положительные и отрицательные ионы в газах, электроны и дырки в полупроводниках, ионы в электролитах.

При прохождении электрического тока через вакуум и сверхпроводники его тепловое действие отсутствует.

О присутствии электрического тока можно узнать по его действию.

В зависимости от явлений, происходящих под действием тока, разделим их на следующие виды:

а) тепловое действие тока – при прохождении электрического тока по проводнику он нагревается (рис. 5.1 *а*);

б) химическое действие тока – при прохождении тока через электролит происходит выделение вещества (рис. 5.1 *б*);

в) магнитное действие тока – магнитная стрелка, расположенная вокруг проводника с током, поворачивается (рис. 5.1 *в*).

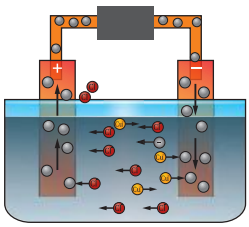
Химическое действие электрического тока наблюдается только в электролитах.



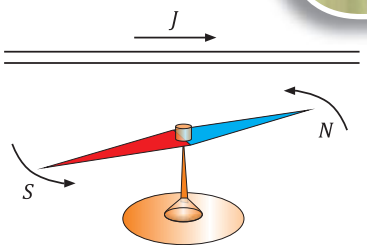
Магнитный эффект электрического тока наблюдается при протекании тока в любой среде



а)



б)



в)

Рис. 5.1

Для количественного описания действия тока вводится физическая величина, называемая силой тока. Сила тока определяется количеством заряда, прошедшего через проводник, и определяется следующим образом:

Величина, численно равная количеству заряда, протекающего через поверхность поперечного сечения проводника за единицу времени, называется силой тока.

Ток обозначается буквой *I*. Единицей силы тока в СИ является ампер (А).

Из определения силы тока её можно найти по формуле:

$$I = q/t. \qquad (1)$$

Сила тока, как и электрический заряд, является скалярной величиной.

Направление упорядоченного движения положительно заряженных частиц принимается за направление электрического тока. Ток во внешней цепи течёт от положительного полюса источника к его отрицательному полюсу. Значит, направление тока противоположно направлению упорядоченного движения электронов (рис. 5.2 *а*).

Если сила и направление тока в цепи во времени не меняются, такой ток называется постоянным током, а если изменяется – переменным током. Когда ток переменный, используем среднее значение тока.

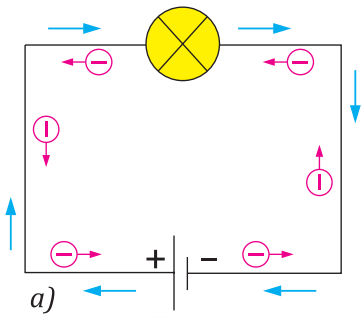
Например, если сила тока изменяется линейно, то среднее значение силы тока находится следующим образом:

$$I_{ср} = \frac{I + I_0}{2} \qquad (2)$$

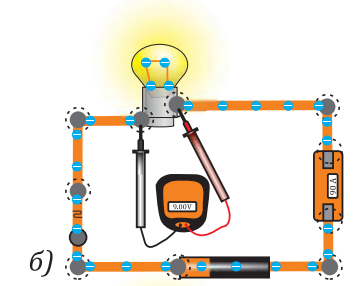
Здесь: I_0 — сила тока в начальный момент времени, I — сила тока после прохождения времени t.

Количество заряда, протекающего по проводнику за время *t*, определяется по формуле $q = I_{ср} \cdot t$.

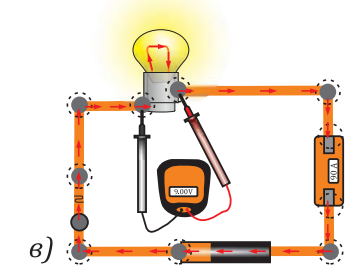
На рисунках 5.2 *б* и 5.2 *в* вы можете непосредственно увидеть направление движения тока и электронов, а в виртуальном виде по ссылке ниже.



а)



б)



в)

Рис. 5.2



2. Плотность тока и единица её измерения

Рассмотрим прохождение электрического тока через металлы.

Отделяем часть проводника с поверхностью поперечного сечения S и длиной Δl (рис. 5.3). Заряд одной частицы, которая является переносчиком тока, равен q_0.

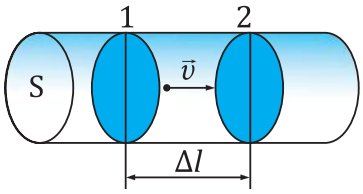


Рис. 5.3

Число частиц между 1-й и 2-й поверхностями отделённой области равно:

$$N = n \cdot V = n \cdot S \cdot \Delta l \qquad (3)$$

Здесь n — концентрация заряженных частиц. Суммарная величина заряда, образующего ток в отделённой части, равна:

$$q = q_0 \cdot N = q_0 \cdot n \cdot S \cdot \Delta l \qquad (4)$$

На основании формулы по определению силы тока имеем следующее:

$$I = \frac{q}{t} = \frac{q_0 \cdot N}{t} = \frac{q_0 \cdot n \cdot S \cdot \Delta l}{t} = n \cdot S \cdot \upsilon \cdot q_0 \qquad (5)$$

Здесь υ — скорость упорядоченного движения (дрейфа) заряженной частицы.

Когда мы говорим о скорости распространения тока в проводнике, то имеем в виду не скорость упорядоченного движения заряженных частиц, а скорость распространения электрического поля в среде. Она близка к скорости света в вакууме ($c = 3 \cdot 10^8$ m/s).

Величина, равная току, проходящему через единицу площади поперечного сечения проводника, называется плотностью электрического тока. Плотность тока обозначается буквой (j).

$$j = \frac{I}{S}$$

Плотность тока измеряется в $[j] = \frac{\text{A}}{\text{m}^2}$:

$$j = \frac{I}{S} = \frac{n \cdot q_0 \cdot \upsilon \cdot S}{S} = n \cdot q_0 \cdot \upsilon$$

Плотность тока является векторной величиной, направление которой соответствует направлению вектора скорости υ упорядоченного движения положительно заряженных частиц.

3. Значение плотности тока в промышленности и технике

Плотность тока в проводнике показывает, насколько проводник снабжается электрической энергией. Во избежание лишних расходов в проводнике, то есть для снижения затрат, необходимо оптимально подобрать плотность тока в нём.

Хотя на величину плотности тока не влияет материал проводника, его выбирают в зависимости от удельного сопротивления и длины проводника в технике. Проводники, используемые в бытовых целях, выбирают по экономичному режиму тока.



1. *Что такое электрический ток?*
2. *Опишите простейший источник тока.*
3. *Под действием чего заряды движутся по проводнику?*
4. *Объясните действия электрического тока.*
5. *Как изменяется энергия в электрической цепи?*
6. *Что вы знаете об условных обозначениях на электрических схемах?*
7. *Какое значение имеет плотность тока в быту и промышленности?*

Примеры решения задач

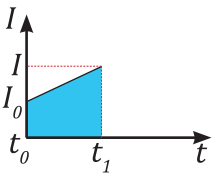
1. По проводнику диаметром 1 mm протекает ток силой 5 A. Вычислите плотность тока в проводнике.

Дано:	**Формула:**	**Решение:**
$D = 1\ \text{mm} = 1\cdot10^{-3}\ \text{m}$ $I = 5\ \text{A}$ $j = ?$	$j = \frac{I}{S}$ $S = \frac{\pi\cdot D^2}{4}$	$S = \frac{3{,}14\cdot\left(1\cdot10^{-3}\,\text{m}\right)^2}{4} = 0{,}785\cdot10^{-6}\,\text{m}^2$ $j = \frac{5\,\text{A}}{0{,}785\cdot10^{-6}\,\text{m}^2} \approx 6{,}37\cdot10^{6}\,\frac{\text{A}}{\text{m}^2}$ **Ответ:** $j \approx 6{,}37\cdot10^{6}\ \text{A/m}^2$.

2. Если по проводнику с площадью поперечного сечения 1 mm^2 протекает ток с силой 1 A, какова дрейфовая скорость электронов? Считайте концентрацию свободных электронов в проводнике равной $n = 10^{28}\ \text{m}^{-3}$.

Дано:	**Формула:**	**Решение:**
$S = 1\ \text{mm}^2 = 1\cdot10^{-6}\ \text{m}^2$ $I = 1\ \text{A}$ $n = 10^{28}\ \text{m}^{-3}$ $\upsilon = ?$	$\upsilon = \frac{I}{enS}$	$\upsilon = \frac{I}{enS} = \frac{1}{1{,}6\cdot10^{-19}10^{28}\cdot10^{-6}} = 6{,}25\cdot10^{-4}\ \text{m/s}$ **Ответ:** $\upsilon = 6{,}25\cdot10^{-4}\ \text{m/s}$.

3. Если ток, проходящий через проводник, изменяется по закону $I = 4 + 3t$, сколько электронов проходит через поверхность поперечного сечения проводника за 2 s?



Дано:	**Формула:**	**Решение:**
$I_0 = 4\ \text{A}$, $k = 3\ \text{A/s}$, $t_0 = \ \text{s}$ $t_1 = 2\ \text{s}$ $q = ?$	$I = I_0 + k\cdot t$ $I_{cp} = (I + I_0)/2$ $q = I_{cp}\cdot t$	$I = (4+3\cdot2)\ \text{A} = 10\ \text{A}$ $I_{cp} = (4+10)/2 = 7\ \text{A}$ $q = 7\cdot2 = 14\ \text{C}$ **Ответ:** $q = 14\ \text{C}$.



Упражнение 26

1. Если через гальванометр протекает ток 1,6 μA, сколько электронов протечёт через него за 10 s?

2. Внутри керосина находится точечный заряд с зарядом 7 nC. Найдите напряжённость электрического поля на расстоянии 10 cm от него. Предположим, что диэлектрическая проницаемость керосина равна 2,1.

3. Какова сила тока в цепи, если через лампочку в цепи за 5 минут прошел заряд в 30 C?

4. Через лампочку, включенную в электрическую цепь, протекает ток силой 0,1 A. Какой заряд проходит через катушку лампочки за 8 минут? Вычислите количество электронов, прошедших за это время через лампочку.

5. Аккумулятор может обеспечивать ток 4 A в течение 25 минут. Какой электрический заряд может хранить такой аккумулятор?

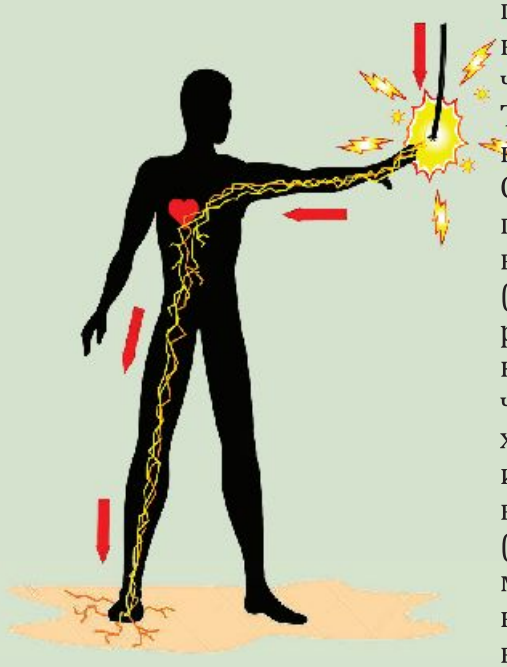
Домашние задания

Строго соблюдайте меры безопасности!

1. Возьмите гальванический элемент (батарейку) калькулятора, фонарика, игрушечного пистолета, управляемой машинки и т.п., и запишите в тетрадь, сколько ампер тока и сколько вольт напряжения он дает.

2. Соедините гальванический элемент и две лампочки сначала последовательно, а затем параллельно через проводники. В обоих случаях обратите внимание на лампочки. Попробуйте объяснить результаты этого опыта.

ПОЛЕЗНАЯ ИНФОРМАЦИЯ



Повреждение током впервые было зафиксировано в 1862 году. Тогда человек погиб, коснувшись обрыва провода под напряжением. Иногда можно получить смертельный удар током, коснувшись электрических проводов. Это связано с тем, что сопротивление сухой кожи составляет 100000 Ω и более. Так не будет ли безопасно прикасаться к 9-вольтовому гальваническому элементу с сопротивлением 100000 Ом? По закону Ома, из отношения 9V ÷ 100000 Ω найдём силу тока 0,00009 ампер. Этого тока недостаточно, чтобы быть опасным. Ток 120 V в настенной розетке создает опасный ток силой 0,0012 ампер (120 V ÷ 100 000 Ω) через кожу. Это в 13 раз больше, чем ток, вырабатываемый в гальваническом элементе. Иногда вода попадает на кожу. Влажная кожа имеет гораздо меньшее сопротивление, чем сухая. Низкое сопротивление позволяет большему току проходить через ваше тело при любом напряжении. Сочетание воды и 120-вольтового электричества особенно опасно. Потому что высокое напряжение и низкое сопротивление вызовут большой (и, возможно, смертельный) ток, протекающий через тело. Поэтому, чтобы им пользоваться, нам нужно научиться правильно подключать устройства к источникам тока. На практике напряжение выше 42 V опасно для организма человека.



ЗАКОН ОМА ДЛЯ ПОЛНОЙ ЦЕПИ

ТЕМА 33

1. Работа сторонних сил по перемещению заряда в источнике тока.
2. Электродвижущая сила источника.
3. Внутреннее сопротивление источника тока.
4. Закон Ома для полной цепи.
5. Короткое замыкание в источнике тока.



1. Укажите формулу закона Ома для участка цепи.
2. Как включаются в цепь вольтметр и амперметр?
3. Что покажет вольтметр, если его подключить к полюсам источника тока?

1. Работа сторонних сил по перемещению заряда в источнике тока

Чтобы создать электрический ток в проводниках, необходимо создать электрическое поле внутри проводника. Нынешние источники выполняют эту задачу. Источники тока разнообразны, и все они работают на разделение положительных и отрицательных зарядов. Разделённые заряды накапливаются на полюсах источника тока.

Полюса – это места, где источник соединяется с проводниками через зажимы. Один полюс источника тока заряжен положительно, а другой – отрицательно,, и между ними образуется внутреннее электрическое поле.

Значит, внутри источника должны быть силы, отличные от электростатических по своей природе. Эти силы называются сторонними силами. Они влияют на заряд внутри источника тока и передают энергию в электрическую цепь. Под действием сторонних сил заряды в источнике тока отделяются друг от друга, что мы и видим на полюсах источника. То есть на положительном полюсе накапливается положительный заряд, а на отрицательном – отрицательный.

Если полюса источника тока соединены с проводником, свободные электроны движутся по проводнику под действием электрического поля, создаваемого сторонними силами в проводнике, и возникает электрический ток. Природа сторонних сил может быть разной.

При разделении зарядов в источниках тока механическая, химическая, внутренняя и другие виды энергии преобразуются в электрическую энергию. Таким образом, в любых источниках тока электроэнергия вырабатывается за счёт других видов энергии.

Например, в электрофорной машине механическая энергия, в термоэлементе внутреняя энергия, в фотоэлементе световая энергия, в гальваническом элементе и батарее химическая энергия преобразуется в электрическую энергию. При работе гальванических элементов происходит разрушение электродов и расход раствора. Поэтому через определённое время их приходится заменять.





В аккумуляторах электроды не разрушаются. Простейший аккумулятор состоит из двух свинцовых пластин, погружённых в раствор серной кислоты.

При зарядке аккумулятора электрический ток совершает работу, в результате чего увеличивается химическая энергия аккумулятора. Когда батарея разряжается, химическая энергия превращается в электрическую.

2. Электродвижущая сила источника

В источнике тока действуют сторонние силы, перемещающие свободные заряды против сил электростатического поля ($A_{ст}$). Чтобы в электрической цепи был ток, сторонние силы должны совершить работу по перемещению заряда внутри проводника.

Физическая величина, равная работе сторонних сил по перемещению единичного положительного заряда по замкнутой цепи, называется электродвижущей силой источника (ЭДС). ЭДС обозначается буквой $\mathcal{E}$ (эпсилон).

По определению запишем ЭДС следующим образом:

$$\mathcal{E} = A_{ст}/q$$

Здесь: $\mathcal{E}$ – ЭДС, $A_{ст}$ – работа сторонних сил, q – заряд. ЭДС источника равен разности потенциалов между его полюсами при разомкнутой цепи. Поэтому единица электродвижущей силы измеряется в вольтах (V), как и разность потенциалов, т. е. 1 V = 1 J/1 C.

3. Внутреннее сопротивление источника тока

Электрическая цепь состоит из совершенно разных частей. Потребители электрического тока, электроизмерительные приборы, токоведущие провода образуют внешнюю часть цепи, а сам источник тока – внутреннюю часть цепи. Обозначим сопротивление внешней части электрической цепи через R, ЭДС действующего на нее источника тока через $\mathcal{E}$, а его внутреннее сопротивление через r.

4. Закон Ома для полной цепи

Замкнём цепь, подключив к источнику тока резистор с сопротивлением R. Пусть ЭДС источника тока равна $\mathcal{E}$, а его внутреннее сопротивление r. В генераторах внутреннее сопротивление r – это сопротивление обмоток, а в гальваническом элементе – сопротивление раствора электролита и электродов.

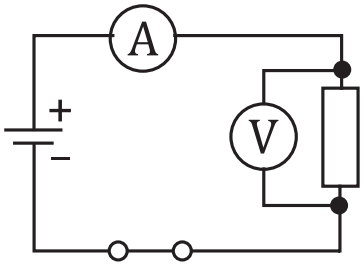


Рис. 5.4

Для замкнутой цепи закон Ома связывает силу тока I в цепи, ЭДС $\mathcal{E}$ и полное сопротивление цепи ($R+r$). Если применить закон Ома к участкам замкнутой электрической цепи, то сумма напряжений во внешней и внутренней частях цепи равна электрической движущей силе источника, т. е.:

$$\mathcal{E} = I \cdot R + I \cdot r = U_R + U_r$$



Тогда

$$I = \mathcal{E}/(R+r)$$

Это уравнение является математическим выражением закона Ома для замкнутой (полной) цепи, которая определяется так:

Ток, протекающий по замкнутой цепи, прямо пропорционален электродвижущей силе и обратно пропорционален полному сопротивлению цепи.

5. Короткое замыкание в источнике питания

Если внешняя цепь отключена, а полюса источника соединены вместе (при $R = 0$), образуется короткое замыкание. Ток короткого замыкания $I_{к.з}$ – это максимальный ток, который может обеспечить источник тока с ЭДС $\mathcal{E}$ и внутренним сопротивлением r:

$$I_{к.з} = \mathcal{E}/r$$

1. Что такое ЭДС?

2. Что означает внутреннее сопротивление источника тока?

3. Чем закон Ома для участка цепи отличается от полной цепи?

4. С чем можно ассоциировать электродвижущую силу?

5. Наблюдали ли вы короткое замыкание?

6. Является ли внутреннее сопротивление источника тока важной величиной?

Примеры решения задач

Для определения ЭДС и внутреннего сопротивления источника к его выводам по очереди подключали резисторы сопротивлением 2 Ω, а затем 4 Ω. Если ток в первом случае был равен 0,5 А, а во втором случае 0,3 А, тогда чему равно внутреннее сопротивление источника и ЭДС?

Дано:	**Формула:**	**Решение:**
$R_1 = 2\ \Omega$ $R_2 = 4\ \Omega$ $I_1 = 0{,}5$ А $I_2 = 0{,}3$ А	$I_1 = \dfrac{\mathcal{E}}{R_1 + r}$ $I_2 = \dfrac{\mathcal{E}}{R_2 + r}$	$0{,}5 = \dfrac{\mathcal{E}}{2+r};\ 0{,}3 = \dfrac{\mathcal{E}}{4+r}$ Из этих выражений следует: $r = 1\ \Omega$; $\mathcal{E} = 1{+}0{,}5\ r = 1{,}5$ V.
$r = ?\ \mathcal{E} = ?$		**Ответ:** $r = 1\ \Omega$; $\mathcal{E} = 1{,}5$ V.



Упражнение 27

1. Если внутреннее сопротивление аккумулятора 0,2 Ω, ЭДС 5 V, а падение напряжения в подключённом к нему проводнике 4,5 V, чему равно сопротивление (Ω) проводника?

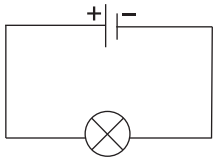
2. При подключении внешнего сопротивления 5 Ω к источнику тока с внутренним сопротивлением 2 Ω напряжение на клеммах источника падает до 10 В. Найдите ЭДС источника.

3. При внешнем сопротивлении цепи 1,5 Ω ток был равен I, а при 4 Ω – $I/2$. Найдите внутреннее сопротивление источника (Ω).

4. Цепь состоит из резистора сопротивлением 4 Ω и источника тока с ЭДС 6 V и внутренним сопротивлением 2 Ω. Чему равно падение напряжения на резисторе (V)?

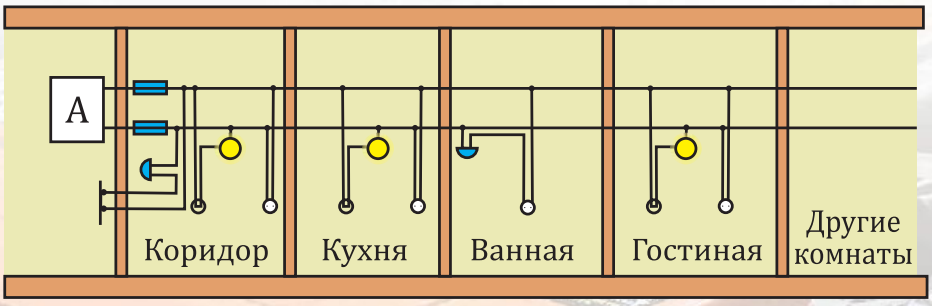
5. Если соединить клеммы батареи с ЭДС 3 V и внутренним сопротивлением 0,6 Ω с металлическим проводником очень низкого сопротивления, какой ток (A) потечёт по нему?

Дополнительные задания



1. Перерисуйте эту схему и добавьте амперметр для измерения тока и вольтметр для измерения напряжения на лампочке.

2. Посмотрите на схему подключения электроприборов в данном доме, расскажите, как они подключены, и определите с помощью условных знаков, какие электроприборы используются.





РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ

ТЕМА 34

Примеры решения задач

1. При подключении источника тока к внешнему сопротивлению R_1=1,8 Ω он дает ток I_1=1,7 A. Найдите ЭДС $\mathcal{E}$ и внутреннее сопротивление r источника, если ток уменьшается при внешнем сопротивлении R_2 = 2,3 Ω и I_2 = 0,56 A.

Дано:	Формула:	Решение:
R_1 = 1,8 Ω I_1 = 1,7 A R_2 = 2,3 Ω I_2 = 0,56 A	$\mathcal{E} = I_1R_1+I_1r$ $\mathcal{E} = I_2R_2+I_2r$	$I_1R_1+I_1r = I_2R_2+I_2r \qquad r = \frac{I_2R_2 - I_1R_1}{I_1 - I_2}$ $r = \frac{(0,56\cdot 2,3 - 0,7\cdot 1,8)\ \text{A}\cdot\Omega}{(0,7-0,56)\ \text{A}} = 0,2\ \Omega$ $\mathcal{E} = I_1R_1 + I_1r = I_1(R_1+r) = 0,7\ \text{A}\cdot(1,8+0,2)\ \Omega = 1,4\ \text{V}$ **Ответ:** r = 0,2 Ω; $\mathcal{E}$ = 1,4 V.
$\mathcal{E}$ = ?, r = ?		

2. Найдите плотность тока в проводнике диаметром 2 mm (A/m^2), если по нему протекает ток силой 3,14 A.

Дано:	Формула:	Решение:
D = 2 mm I = 3,14 A	$j = \frac{I}{S}$	$j = \frac{I}{\pi\cdot\frac{D^2}{4}} = \frac{3,14\ \text{A}}{3,14\frac{\left(2\cdot 10^{-3}\right)^2}{4}\ \text{m}^2} = \frac{4000000\ \text{A}}{4\ \text{m}^2} = 1000000\ \frac{\text{A}}{\text{m}^2}$
j = ?	$S=\pi R^2$; $D=2R$ $j = \frac{I}{\pi\cdot\frac{D^2}{4}}$	**Ответ:** $j = 1\cdot 10^6$ A/m^2.

Упражнение 28

1. Амперметр с внутренним сопротивлением R_A = 2 Ω, подключённый к клеммам батареи, показывает силу тока I = 5 A. Найдите ток короткого замыкания, если вольтметр с внутренним сопротивлением R_V = 150 Ω показывает напряжение U = 12 V на тех же клеммах батареи.

2. Какова плотность тока (A/m^2), если концентрация свободных электронов в медной проволоке $8\cdot 10^{28}$ m^{-3}, а скорость их упорядоченного движения $5\cdot 10^5$ m/s?

3. В цепь, питаемую гальваническим элементом с внутренним сопротивлением r = 3 Ω, входят, как показано на рис. 5.5, два резистора сопротивлениями R_1 = R_2 = 28 Ω, включенные параллельно, и резистор сопротивлением R_3 = 40 Ω. Параллельно резистору сопротивлением R_3 подключен конденсатор

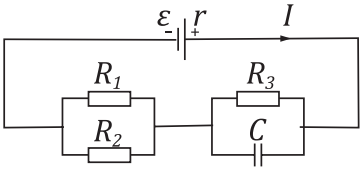


Рис. 5.5



электроёмкостью C = 5 μF, заряд которого $q = 4{,}2 \cdot 10^{-6}$ C. Определите ЭДС элемента.

4. Батарея из 3-х элементов, каждый из которых имеет ЭДС $\mathcal{E}$=1,5 V и внутреннее сопротивление r = 0,5 Ω, подключена к внешней цепи, как показано на рис. 5.6. Если сопротивления во внешней цепи R_1 = 1,2 Ω, R_2 = 1 Ω, R_3 = 4 Ω, R_4 = 1 Ω, то найдите токи I_1, I_2, I_3, I_4, проходящие через каждое сопротивление, и напряжения в них U_1, U_2, U_3, U_4.

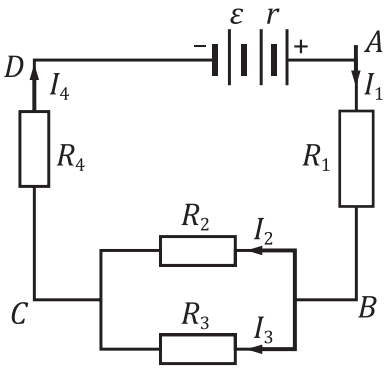


Рис. 5.6

5. Батарея, образованная параллельным соединением 2-х элементов с ЭДС $\mathcal{E}$ = 1,2 V и внутренним сопротивлением r = 0,5 Ω, подключается к внешней цепи, как показано на рис. 5.7. Если сопротивления в цепи R_1=2,75 Ω, R_2=6 Ω, R_3=3 Ω и R_4=20 Ω, найдите ток через резистор R_3.

6. Резистор сопротивлением 2 Ω подключён к источнику постоянного тока с ЭДС 12 V и внутренним сопротивлением 1 Ω. Вычислите силу тока через источник (A).

7. Внешнее сопротивление электрической цепи в 4 раза больше внутреннего сопротивления источника. Если ЭДС источника составляет 12,5 V, определите падение напряжения на внешнем резисторе (V).

8. Лампочка сопротивлением 19,5 Ω подключена к батарее с ЭДС 5 V и внутренним сопротивлением 0,5 Ω. Какой будет сила тока при коротком замыкании?

9. При коротком замыкании источника тока с внутренним сопротивлением 0,01 Ω сила тока составила 1200 A. Найдите ЭДС источника (V).

10. Лампу сопротивлением 4 Ω подключили к аккумулятору с внутренним сопротивлением 2 Ω и ЭДС 12 V. Найдите напряжение на клеммах аккумулятора.

11. Найдите плотность тока, если сила тока равна 5 μA в проводнике с площадью поперечного сечения 4 mm^2.

12. Концентрация электронов проводимости в проводе площадью поперечного сечения 10 mm^2 составляет $5 \cdot 10^{28}$ m^{-3}. Какова средняя скорость электронов при силе тока 10 A?

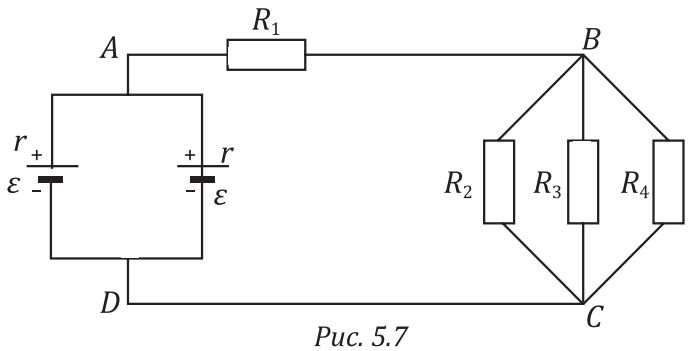


Рис. 5.7



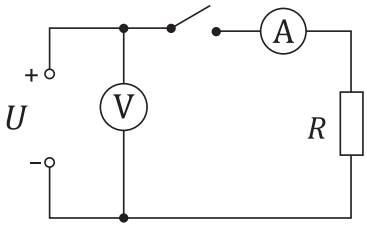
ТЕМА 35

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОДВИЖУЩЕЙ СИЛЫ И ВНУТРЕННЕГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ИСТОЧНИКА ТОКА

Цель работы: определить электродвижущую силу и внутреннее сопротивление источника тока с помощью амперметра и вольтметра.

Необходимые инструменты: лабораторный универсальный источник тока или батарейка, амперметр, вольтметр, включатель, соединяющие провода, резисторы с сопротивлением 10 Ω и 20 Ω.



Выполнение работы

1. Соберите электрическую цепь, показанную на рисунке. Подсоедините к цепи резистор с сопротивлением 10 Ω.

2. Запишите показания вольтметра U_V при открытом ключе. Считайте, что $U_V = \mathcal{E}$.

3. Включите цепь и запишите как показано амперметра I_A.

4. Запишите результаты измерений в таблицу.

№	U_V, (V)	U_2, (V)	I_A, (A)	$\mathcal{E}$, (V)	r, (Ω)

5. Вычислите внутреннее сопротивление источника тока по формуле $r = \frac{\varepsilon - U_2}{I}$ и занесите результат в таблицу.

6. Подсоедините к цепи резистор сопротивлением 20 Ω и повторите эксперимент.

7. Сравните r_1 и r_2, найденные в экспериментах 1 и 2.



1. Какая часть электрической цепи называется внутренней цепью, а какая часть внешней цепью?

2. Что вы понимаете под ЭДС источника?

3. За счёт чего появляется внутреннее сопротивление источника?



ТЕМА 36

ЗАВИСИМОСТЬ СОПРОТИВЛЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПРОВОДНИКОВ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

1. Температурная зависимость сопротивления металлических проводников.
2. Сверхпроводимость.



1. Какие источники электроэнергии вы знаете?
2. Какие проводники (провода) чаще всего применяют в линиях электропередач?
3. Какие проводники вы видели на столбах и можно ли их заменить другим типом проводников?

1. Температурная зависимость сопротивления металлических проводников

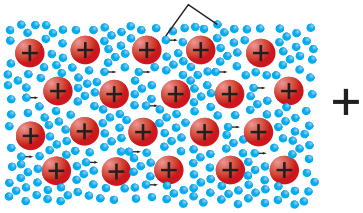
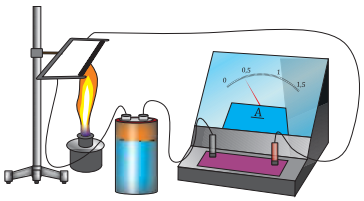


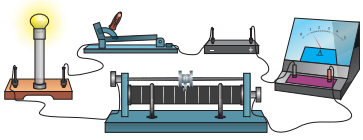
Рис. 5.8

Изучая физику в предыдущих классах, вы узнали, что сопротивление (R) металлических проводников зависит от типа вещества и его геометрических размеров (длины l и площади поперечного сечения S). Повышение температуры в металлах приводит к увеличению скорости свободных электронов и числа столкновений. Кроме того, увеличивается амплитуда колебаний ионов в узлах кристаллической решетки и число их столкновений с движущимися электронами. В результате упорядоченная скорость заряженных частиц уменьшается, что приводит к уменьшению тока (рис. 5.8).

Зависит ли сопротивление от температуры проводника?



а)



б)

Рис. 5.9

Давайте проведём эксперимент. Соберём электрическую цепь, состоящую из гальванометра, спирали из металлической проволоки и источника тока (рис. 5.9 *а*). Этот опыт показывает, что при нагреве катушки её сопротивление увеличивается. Опыт также показывает, что при нагревании металлического проводника показания гальванометра уменьшаются.

Или же соберём электрическую цепь как на рис. 5.9 *б* и проведём эксперимент. Сначала лампочка горит ярко. По мере нагрева катушки яркость лампочки уменьшается. Если к цепи последовательно подключить амперметр, он покажет, что проходящий ток уменьшился. Из этих опытов можно заключить, что сопротивление металлов увеличивается с повышением температуры. Удельное сопротивление металлического вещества-проводника зависит от концентрации свободных носителей заряда и числа столкновений с ионами кристаллической решётки, которые колеблются вокруг устойчивых положений равновесия.

Концентрация свободных электронов в металлических проводниках практически постоянна для данного проводника и не зависит от температуры. Однако число столкновений свободных



электронов с ионами кристаллической решётки увеличивается с ростом температуры. Это приводит к увеличению сопротивления металлического проводника при повышении температуры.

При описании температурной зависимости сопротивления проводников вводят температурный коэффициент сопротивления (а). В этом случае α называют температурным коэффициентом сопротивления.

α – коэффициент, показывающий, какую часть от сопротивления проводника при 0 °С составляет изменение сопротивления проводника при изменении температуры на 1 °С:

$$\alpha = \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0 \cdot (T - T_0)} \qquad (1)$$

Здесь ρ_0 и ρ — удельное сопротивление материала проводника при T_0 = 273 К (0 °С) и заданной температуре (T). Необходимо учитывать зависимость сопротивления проводника от температуры в точных электронных схемах. Неучёт этого может привести к дополнительным ошибкам.

Если найдём удельное сопротивление (ρ) вещества проводника при температуре (T), то получим формулу:

$$\rho = \rho_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T) \qquad (2)$$

Здесь $\Delta T = T - T_0$. Увеличение абсолютной температуры проводника такое же, как увеличение температуры по шкале Цельсия, т.е.: $\Delta T = \Delta t$. Таким образом, сопротивление металлического проводящего материала увеличивается с повышением температуры.

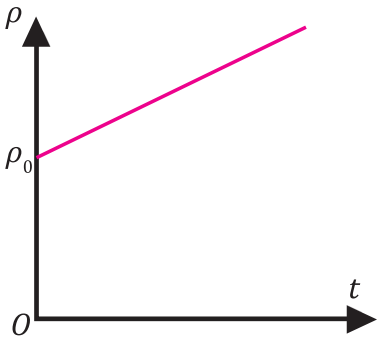


Рис. 5.10

График этой зависимости показан на рис. 5.10.

В следующей таблице приведены температурные коэффициенты удельного сопротивления некоторых металлов:

Металл или сплав	α, °С$^{-1}$	Металл или сплав	α, °С$^{-1}$
Алюминий	0,0042	Никель	0,0065
Висмут	0,0046	Ниобий	0,003
Вольфрам	0,0045	Нихром	0,0002
Железо	0,0062	Олово	0,0044
Золото	0,0040	Платина	0,0039
Индий	0,0047	Ртуть	0,0010
Кадмий	0,0042	Свинец	0,0042
Кобальт	0,0060	Серебро	0,0040
Медь	0,0039	Хром	0,0059
Молибден	0,0050	Хромель	0,000065
Натрий	0,0055	Цинк	0,0042



При нагреве проводников их геометрические размеры почти не меняются. Сопротивление проводника изменяется в основном за счёт изменения удельного сопротивления. Используя тот факт, что сопротивление проводника при температуре 0 °С равно $R_0 = (\rho_0 \cdot l)/S$, а его сопротивление при температуре t °С равно $R = (\rho \cdot l)/S$, можно найти R, поделив почленно обе формулы, получаем формулу

$$R = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T) \qquad (3)$$

Для металлических проводников эти формулы используются при температуре $T > 140$ К. У всех металлов их сопротивление увеличивается с повышением температуры, т. е. температурный коэффициент сопротивления α имеет положительное значение. Для большинства металлов (но не сплавов) среднее значение температурного коэффициента сопротивления при температурах от 0 до 100 °С составляет: $\alpha \approx 1/273$ °С$^{-1}$.

При измерении зависимости сопротивления металла от температуры применяют специальные приборы – термометры сопротивления (рис. 5.11).



Рис. 5.11

2. Сверхпроводимость

Согласно формуле (2), удельное сопротивление r металлов должно уменьшаться по кривой линии (рис. 5.12) при понижении температуры. Но экспериментальные результаты показывают, что зависимость r от T происходит по кривой линии как на рис. 5. Было замечено, что удельное сопротивление некоторых чистых металлов (Al, Pb, Zu и др.) скачком уменьшается до нуля при температурах, близких к абсолютному нулю ($T_К = 0{,}14 – 20$ К) (рис. 5.12), и они становятся сверхпроводящими. Впервые это явление было обнаружено 28 апреля 1911 г. голландским физиком Г. Камерлинг-Оннесом на основе эксперимента. Он обнаружил, что при охлаждении ртути жидким гелием сопротивление ртути сначала постепенно уменьшается, а затем резко падает до нуля, когда температура достигает 4,1 К. Если в сверхпроводящем кольцевом проводнике возникает ток, а затем источник удаляется, сила этого тока будет оставаться постоянной сколь угодно долго. Действительно, Камерлинг-Оннес наблюдал, что свинец при температуре 7 К продолжал проводить электрический ток в течение 4 дней после окончания действия ЭДС. Практическое использование явления сверхпроводимости затруднено из-за низкой критической температуры. В дальнейших исследованиях это состояние наблюдается во многих металлах и сплавах при температурах ниже 25 К. В эксперименте, проведённом Коллинзом в 1957 году, ток протекал непрерывно в течение 2,5 лет в замкнутой цепи без источника тока. В 1986 г. наблюдался высокотемпературный (100 К) процесс сверхпроводимости в металлокерамических материалах. В этой области проводится много исследований, учитывая, что практическое применение явления сверхпроводимости может принести экономическую выгоду.

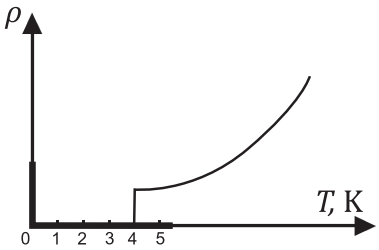


Рис. 5.12



Принцип работы термометров сопротивления основан на температурной зависимости электрического сопротивления металлов. Такие термометры позволяют измерять температуру с точностью до 0,003 К. Особенно в местах, где трудно использовать жидкостные термометры, их значение неоценимо.

1. Как изменяется сопротивление металлов при повышении температуры?

2. Как используется изменение сопротивления металлов в зависимости от температуры?

3. Каковы перспективы использования состояния сверхпроводимости в промышленности и на транспорте?

4. От каких величин зависит сопротивление проводника?

5. Как вычисляется сопротивление проводника?

Пример решения задачи

Вольфрамовая катушка в лампочке имеет сопротивление 30 Ω при 20 °C. При подключении лампочки к источнику постоянного тока 220 V ток, проходящий через неё, был равен 0,6 A. Определите температуру спирали в момент горения лампочки. Температурный коэффициент сопротивления вольфрама равен α = 0,005 1/°C.

Дано:	Формула:	Решение:
t_1 = 20 °C R_1 = 30 Ω U = 220 V I = 0,6 A α = 0,005 °C^{-1}	$R_1 = R_0\,(1+\alpha\cdot t_1)$ $R = \frac{U}{I}$ $R = R_0\,(1+\alpha\cdot\Delta t)$	$R_0 = \frac{30\ \Omega}{1+0,005\frac{1}{°C}\cdot 20\,°C} \approx 27\ \Omega$ $R = \frac{220\,V}{0,6\,A} \approx 367\ \Omega$ $\Delta t = \frac{(367-27)\ \Omega}{27\ \Omega\cdot 0,005\ \frac{1}{°C}} \approx 2518\ °C$
Δt = ?		**Ответ:** Δt =2518 °C.

Упражнение 29

1. Как изменится температура медного стержня при пропускании через него тока плотностью 9 A/mm^2 в течение 0,5 s? Удельное сопротивление меди 1,7·10^{-8} Ω·м, плотность 8900 kg/m^3, удельная теплоёмкость 380 Дж/(kg·°C^{-1}).

2. Если спираль из ниобия нагреть до 100 °C, во сколько раз изменится её удельное сопротивление? Для ниобия α = 0,003 °C^{-1}.



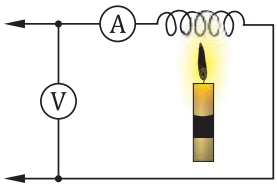
3. Сопротивление никелевой проволоки при 20 °C равно 20 Ω. Чему будет равно сопротивление, если проволоку нагреть до 120°C? Для никеля α = 0,0001 $°C^{-1}$.

4. Сопротивление катушки из медной проволоки 10 Ω при 20 °C. После подключения к вилке сопротивление катушки было равно 16,2 Ω. До какой температуры нагревается спираль? Температурный коэффициент сопротивления меди равен $4{,}15 \cdot 10^{-3}$ $°C^{-1}$.

5. До какой температуры (°C) надо нагреть алюминий при 0 °C, чтобы его сопротивление удвоилось? Температурный коэффициент сопротивления для алюминия равен $\alpha = 4 \cdot 10^{-3}$ $°C^{-1}$.

Дополнительные задания

1. Поясните рисунок 5.13, опираясь на приведённую выше информацию.



5.13–rasm

2. Электроэнергия передаётся от электростанций в города и на большие расстояния. Электричество обычно передаётся по воздушным линиям электропередач. Однако в последние годы возрастает потребность в прокладке электрических кабелей под землёй.

Вопрос:

а) Назовите два места, где можно проложить подземные кабели электричества.

б) Назовите два преимущества воздушных линий электропередач по сравнению с подземными кабелями.

г) Назовите два преимущества подземных кабелей перед воздушными линиями электропередач.





Примеры решения задач

1. Сопротивление вольфрамовой нити лампы накаливания при температуре t_1 = 20 °C равно R_1 = 40 Ω. Найдите её сопротивление R_0 при температуре t_0 = 0 °C. Найдите сопротивление R_2 и температуру t_2 вольфрамовой нити, если при подключении лампы накаливания к источнику тока с напряжением U = 120 V через вольфрамовую нить проходит ток I = 0,3 A. Температурный коэффициент сопротивления для вольфрама равен $\alpha = 4{,}6 \cdot 10^{-3}$ °C^{-1}.

Дано:	Формула:	Решение:
$t_1 = 20$°C $R_1 = 40$ Ω $U = 120$V $t_0 = 0$°C $I = 0{,}3$ A $\alpha = 4{,}6 \cdot 10^{-3}$ °C^{-1} R_0 =? R_2 = ? t_2 = ?	$R = R_0 (1+\alpha \cdot \Delta t)$	$R_0 = \frac{R_1}{1+\alpha t_1} = \frac{40\ \Omega}{1+4{,}6 \cdot 10^{-3}\ °C^{-1} \cdot 20\ °C} = 36{,}63\ \Omega$ $R_2 = \frac{U}{I} = \frac{120\,V}{0{,}3\,A} = 400\,\Omega$ $t_2 = \frac{R_2 - R_0}{R_0 \cdot \alpha} = \frac{(400 - 36{,}63)\ \Omega}{36{,}63\ \Omega \cdot 4{,}6 \cdot 10^{-3}\ °C^{-1}} = 2157\ °C$ **Ответ:** R_0 =36,63 Ω, R_2 = 400 Ω, t_2 = 2157 °C.

2. Сопротивление вольфрамовой нити накаливания в лампочке равно 35,8 Ω при температуре 20 °C. Определите температуру нити накала, если при включении лампочки в сеть 120 V через нить накала протекает ток 0,33 A.

Дано:	Формула:	Решение:
t_1=20 °C $R_1 = 35{,}8$ Ω $I = 0{,}33$ A $\alpha = 4{,}6 \cdot 10^{-3}$ °C^{-1} $U = 120$ V t_2 = ?	$R_1 = R_0(1 + \alpha t_1)$ $R = R_0(1 + \alpha \Delta t_2)$ $R_2 = U/I$	$R_0 = \frac{R_1}{1+\alpha t_1}$ $\frac{U}{I} = \frac{R_1}{1+\alpha t_1}(1 + \alpha t_2)$ $t_2 = \frac{U(1+\alpha t_1) - IR_1}{\alpha I R_1}$ $t_2 = \frac{120\,V(1+4{,}6 \cdot 10^{-3}\ °C^{-1} \cdot 20\ °C) - 0{,}33\ A \cdot 35{,}8\ \Omega}{4{,}6 \cdot 10^{-3}\ °C^{-1} \cdot 0{,}33\ A \cdot 35{,}8\ \Omega} = 1935\ °C$ **Ответ:** t_2 = 1935 °C.



Упражнение 30

1. Сопротивление вольфрамовой нити в лампочке при 0 °C равно 300 Ω, а при горении лампочки её сопротивление равно 2400 Ω. Определите температуру накаливания нити. Термический коэффициент сопротивления для вольфрама равен 0,005 $°C^{-1}$.

2. Сопротивление электромагнита из медной проволоки составляет 2 Ω при 20 °C, а после длительной работы стало равно 2,4 Ω. До какой температуры нагрелся чайник?

3. Реостат из железной проволоки, миллиамперметр и источник тока соединены последовательно. При температуре 0 °C сопротивление реостата R = 200 Ω. Сопротивление миллиамперметра равно r = 20 Ω, а его показание равно I_0 = 30 mA. Какое значение покажет миллиамперметр, если реостат нагреть до 50 °C? Температурный коэффициент сопротивления железа равен $\alpha = 6 \cdot 10^{-3}$ $°C^{-1}$. Внутренним сопротивлением источника пренебречь.

4. На сколько процентов изменится мощность, потребляемая электромагнитом из медной проволоки, при изменении температуры от t_1 = 0 °C до t_2 = 30 °C? Температурный коэффициент сопротивления меди равен $\alpha = 4{,}3 \cdot 10^{-3}$ $°C^{-1}$.

5. Сопротивление катушки из медной проволоки равно 10 Ω при температуре 14 °C. После подключения к вилке сопротивление катушки было равно 12,2 Ω. До какой температуры нагревается катушка? Температурный коэффициент сопротивления меди равен $4{,}15 \cdot 10^{-3}$ $°C^{-1}$.

6. На колбе лампы есть надпись 220 V, 100 W. Для измерения сопротивления нити в холодном состоянии (0 °C) на лампу подали напряжение 2 V, а ток был равен 54 mA. Найдите температуру накаливания. Температурный коэффициент сопротивления вольфрама равен $\alpha = 4{,}8 \cdot 10^{-3}$ $°C^{-1}$.

7. Сопротивление платиновой проволоки при 20 °C равно 20 Ω, а при 500 °C – 59 Ω. Найдите температурный коэффициент сопротивления платины.

8. До какой температуры (°C) надо нагреть алюминий, чтобы его сопротивление увеличилось в 3 раза по сравнению с сопротивлением при температуре 0 °C? Температурный коэффициент сопротивления для алюминия равен $\alpha = 4 \cdot 10^{-3}$ $°C^{-1}$.





ПРОЕКТНАЯ РАБОТА

АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Цель: изучение альтернативных источников энергии.

«Нетрадиционные» источники энергии, вырабатывающие электроэнергию: солнце, ветер, геотермальная, водородная и др.

Солнечная энергия. Солнечная энергия – это энергия излучения, возникающая в результате термоядерных реакций, происходящих на Солнце.



Стандартная панель

Способы получения электрической и тепловой энергии из солнечного излучения.

1. Получение электричества с помощью фотоэлемента.
2. Гелиотермальная энергия – нагрев поверхности тела под действием солнечных лучей.
3. «Солнечные паруса» – преобразование солнечного света в кинетическую энергию в безвоздушном пространстве.
4. Воздушная тепловая электростанция для преобразования солнечной энергии в энергию воздушных потоков.
5. Солнечная аэростатная электростанция – генерация воздуха внутри баллона аэростата в результате нагрева поверхности аэростата.



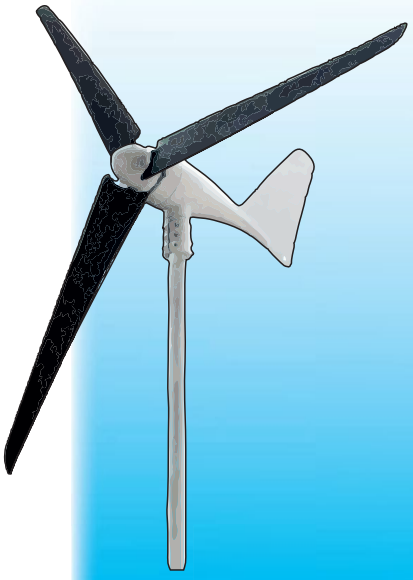
Гибкая панель

Модули солнечных панелей.

Энергия ветра. Энергия ветра – это энергия, вырабатываемая движением воздушных масс.

Лопасти, вращающиеся под действием ветра, передают движение электрогенератору через вал. Здесь, в свою очередь, вырабатывается электричество.

Узнаем, как вырабатывать электроэнергию с помощью энергии ветра



Необходимое оборудование: консервная банка, электродвигатель, деревянная линейка, пенопластовая подставка, соединительные провода, фен, электрическая лампочка, термоклей, ножницы, электропаяльник.

Порядок выполнения работы

1. С помощью ножниц сделайте трех- или четырёхлопастный пропеллер из консервной банки или пластикового контейнера.
2. Приклейте электродвигатель к линейке при помощи клея.
3. Приклейте пропеллер к оси вращения электродвигателя.
4. Прикрепите линейку вертикально к пенопластовой подставке с помощью клея.





5. Подсоедините соединительные провода к двум полюсам электродвигателя с помощью электропаяльника. Если у вас нет электропаяльника, прикрепите их с помощью зажимов.

6. Подключите светодиод к другому концу соединительных проводов с помощью зажима.

7. Проверьте готовое устройство на ветру и посмотрите, как загорится светодиод.

8. Если ветра нет, с помощью фена создайте искусственный ветер, повращайте устройство и сделайте вывод.

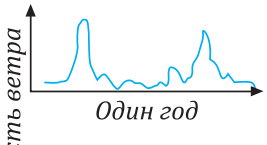
Какой вид энергии был преобразован в эксперименте?

Определите, на что нужно обратить внимание, чтобы получить какую-либо энергию от ветра.

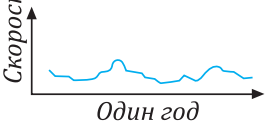
На графиках ниже показаны средние значения скорости ветра за год в 4 разных местах.

Задание 1. На каком графике показано наиболее подходящее место для строительства ветрогенератора?

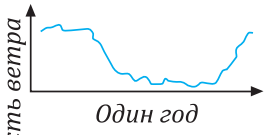
а)



б)



в)



г)



Задание 2. Напишите одно преимущество и один недостаток энергии ветра по сравнению с нефтью, углём и другими ископаемыми источниками энергии.

Преимущество: _____.

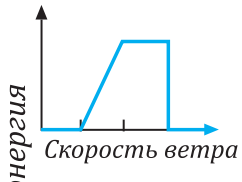
Недостаток: _____.

Задание 3. Чем сильнее ветер, тем быстрее крутятся лопасти ветрогенератора и вырабатывается больше электроэнергии.

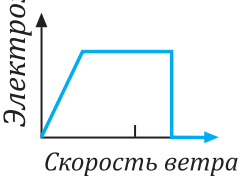
Однако скорость ветра не связана напрямую с мощностью вырабатываемой электроэнергии.

Ниже приведены четыре условия, при которых производится энергия ветра.

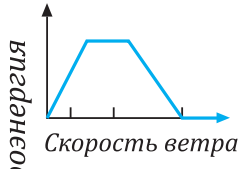
а)



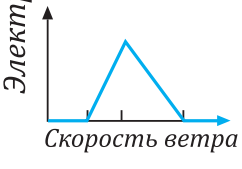
б)



в)



г)



- Лопасти вращаются, когда скорость ветра равна υ_1.
- Когда скорость ветра превышает υ_2, скорость вращения лопастей не увеличивается из соображений безопасности.
- Электрическая энергия максимальна, когда скорость ветра равна υ_2.
- Лопасти перестают вращаться, когда скорость ветра равна υ_3.

Какой график лучше всего показывает взаимосвязь между скоростью ветра и произведённой электроэнергией?

Задание 4. На какой высоте от поверхности Земли все лопасти ветряного генератора вращаются с одинаковой скоростью?



Выберите правильный ответ, объясняющий, почему лопасти ветряных генераторов на больших высотах вращаются с одинаковой скоростью.

а) Чем выше над уровнем земли, тем ниже плотность воздуха.

б) Чем выше над уровнем земли, тем ниже температура.

г) Чем выше над уровнем земли, тем выше влажность воздуха.

д) Чем выше над уровнем земли, тем чаще идут дожди.

?

1. Как происходит преобразование энергии одного вида в другой в ветряных мельницах?

2. Как полученная энергия связана со скоростью ветра?

3. Есть ли в вашем районе подходящее место для строительства ветрогенератора?

4. Какой регион Узбекистана, на ваш взгляд, подходит для строительства ветрогенераторов?

5. Какое значение, по вашему мнению, имеет строительство ветрогенераторов для развития нашей страны?





ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ ПО ГЛАВЕ V

1. Какая электростатическая сила (N) действует на заряд 5 μC, расположенный в точке с напряжённостью поля 800 V/m?

2. Металлический шар радиусом 6 cm имеет заряд 24 nC. Чему равно напряжение в точке на расстоянии 9 cm от центра шара (kV/m)?

3. Положительный заряд 0,18 μC равномерно распределён по поверхности шара радиусом 12 cm. Найдите потенциал поля в центре шара (V).

4. При перемещении точечного заряда q между двумя точками с разностью потенциалов 100 V совершается работа 5 μJ. Какова величина заряда q (μC)?

5. ЭДС аккумулятора равна 1,55 V. При подключении к нему внешнего резистора сопротивлением 3 Ω напряжение на клеммах аккумулятора равно 0,95 V. Чему равно внутреннее сопротивление батареи?

6. Ток в цепи, подключённой к батарее с ЭДС 30 V, равен 3 A. Напряжение на клеммах батареи равно 18 V. Найдите внутреннее сопротивление батареи и сопротивление внешней цепи.

7. При подключении источника электрического тока к сопротивлению 5 Ω сила тока в цепи равна 5 A, а при подключении к сопротивлению 2 Ω сила тока в цепи равна 8 A. Найдите внутреннее сопротивление и ЭДС источника.

8. ЭДС источника тока 1,5 V. Ток короткого замыкания 30 A. Каково внутреннее сопротивление источника? Если элемент подключён к катушке с сопротивлением 1 Ω, каково напряжение на его клеммах?

9. Элементы с ЭДС 1,5 V и 2 V соединяются полюсами одинакового знака. Вольтметр, подключённый к клеммам аккумулятора, показал напряжение 1,7 V. Найдите отношение внутренних сопротивлений источников.

10. Внутренние сопротивления элементов с ЭДС 1,3 V и 2 V равны 0,1 Ω и 0,25 Ω соответственно. Они подключены параллельно. Найдите силу тока в цепи и напряжение на зажимах источников.

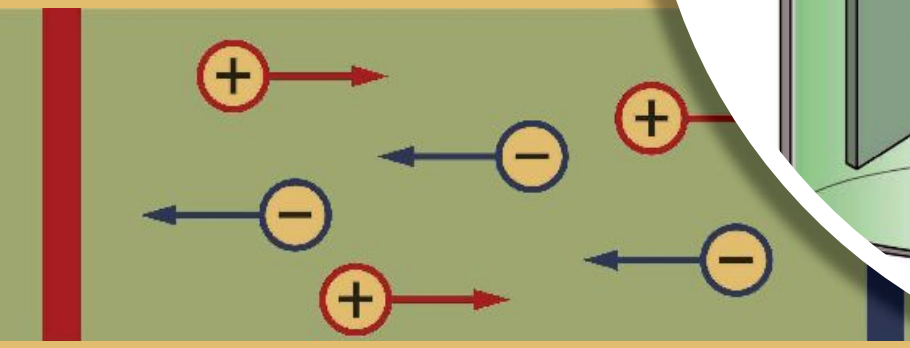
11. Какова энергия поля в конденсаторе, если напряжение на обкладках конденсатора 150 V, а заряд 80 μC?

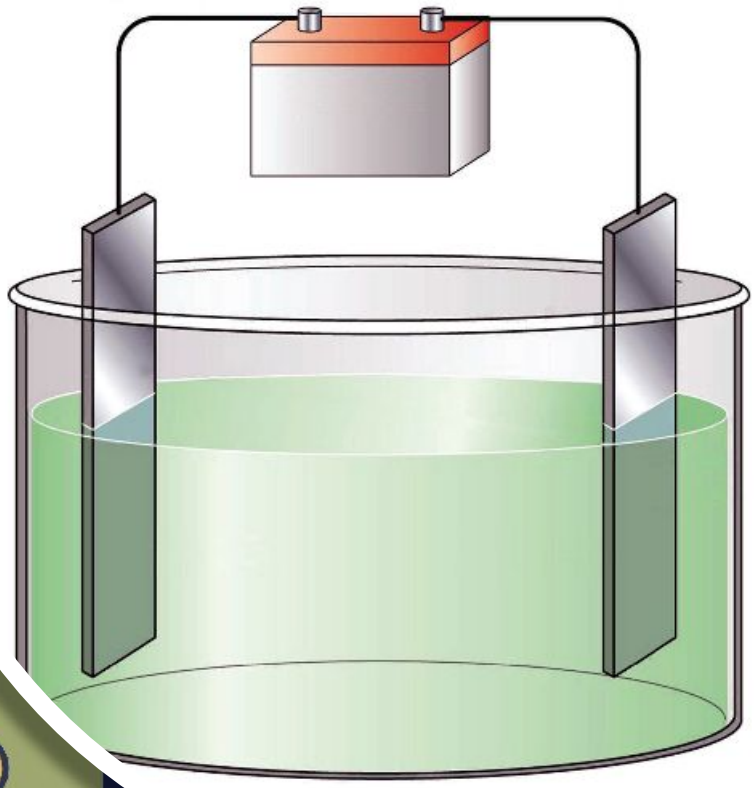
12. Плоский конденсатор имеет заряд 2 μC и энергию поля 0,5 μJ. Какова ёмкость конденсатора?

13. При подаче на плоский конденсатор заряда $4 \cdot 10^{-5}$ C его энергия равна 20 μJ. Найдите напряжение на обкладках конденсатора.

14. Найдите плотность энергии электрического поля (μJ/m^3) в точке с напряжённостью $3 \cdot 10^3$ V/m. Диэлектрическая проницаемость среды равна 4.

Глава VI





ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В РАЗЛИЧНЫХ СРЕДАХ

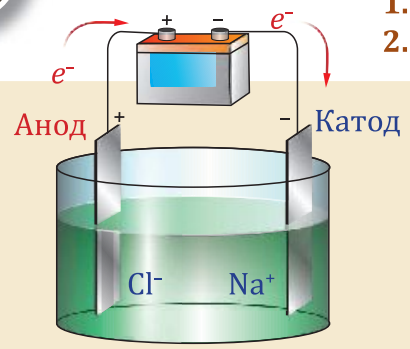
В этой главе вы изучите следующие темы:

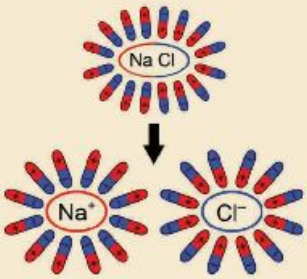
- электрический ток в жидкостях;
- первый и второй законы Фарадея;
- применение электролиза в быту и в технике;
- электрический ток в газах;
- полупроводники и их отличие от металлов;
- электропроводимость полупроводников;
- полупроводниковые приборы и их применение в технике.



ТЕМА 38 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ЖИДКОСТЯХ

1. Ионная связь
2. Электролиты





Почему ионы разных знаков в электролите в результате взаимного притяжения объединяются и превращаются в нейтральные молекулы? Почему в электролите молекулы всегда распадаются на ионы?

Вода, которая течёт по канаве, вода, в которой растворена соль или кислота, жидкости внутри аккумуляторов машин имеют ионную проводимость и считаются электролитами.

1. Ионная связь

Известно, что атомы многих веществ могут быть связаны друг с другом тремя основными способами: металлической связью, ковалентной связью и ионной связью. Примером ионной связи является поваренная соль – хлорид натрия (NaCl). Атом натрия (Na) имеет 11 электронов, 1 из которых находится на внешней электронной оболочке. Атом хлора (Cl) имеет 17 электронов, 7 из которых вращаются во внешней электронной оболочке (рис. 6.1 *а*).

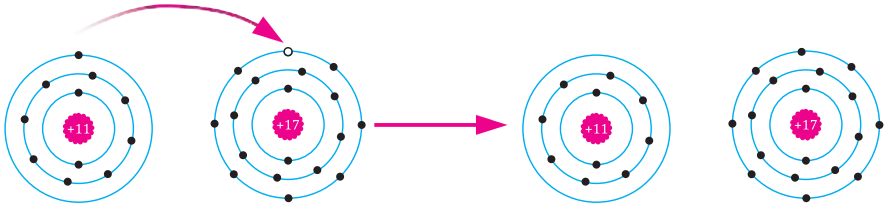


Рис. 6.1

Отдельные атомы всех химических элементов электронейтральны. Потому что количество положительно заряженных протонов в ядре атома равно количеству отрицательно заряженных электронов, вращающихся вокруг ядра. Соответственно, атомы Na и Cl электронейтральны.

Когда атомы хлора и натрия сближаются, происходит обмен электронами. Атом хлора забирает 1 электрон с внешней электронной оболочки атома натрия. В результате атом хлора превращается в отрицательно заряженный ион хлора (Cl^-), то есть $Cl^\circ + e^- \dashrightarrow Cl^-$, а атом натрия превращается в положительно заряженный ион натрия (Na^+), то есть $Na^\circ - e^- \dashrightarrow Na^+$ (рис.6.1 *б*). Ионы натрия и хлора разных знаков притягиваются друг к другу (под действием кулоновской силы) и образуют кристаллическую решётку NaCl (рис. 6.2). В этом случае реакция образования молекулы поваренной соли выражается следующим образом:

$$2Na + Cl_2 = 2NaCl. \quad (1)$$

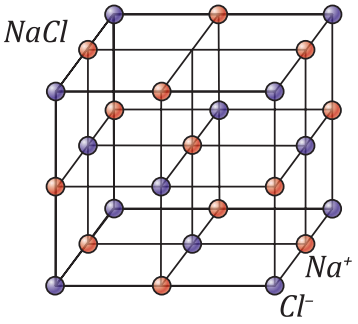


Рис. 6.2



Химическая связь, образующаяся между ионами за счёт кулоновской силы, называется ионной связью.

Многие вещества в природе имеют ионную связь. Примерами таковых являются соли, щёлочи, кислоты.

2. Электролиты

Некоторые жидкости могут проводить электричество, а другие нет. Например, чистая (дистиллированная) вода не проводит электрический ток. Водные растворы солей, щелочей и кислот являются хорошими проводниками электричества, даже если они не обладают электронной проводимостью. Такие растворы обладают ионной проводимостью.

Электропроводность жидкостей можно определить с помощью простого оборудования, показанного на рис. 6.3. В основном они состоят из стеклянного контейнера и опущенных в него двух угольных стержней – электродов, лампочки, выключателя, источника питания и соединительных проводов.

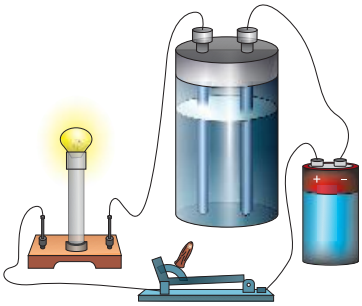


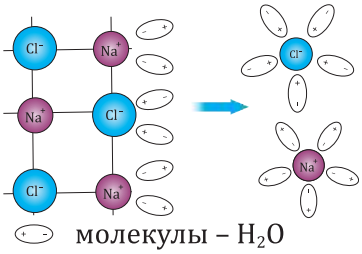
Рис. 6.3

В стеклянную ёмкость с электродом наливается дистиллированная вода, и при подключении выключателя видим, что лампочка не горит. Итак, дистиллированная вода не проводит электричество. Отключаем выключатель, добавляем в воду в ёмкости немного поваренной соли (NaCl) и видим, что при включённом выключателе загорается лампочка. Итак, солёная вода проводит электричество. Что является причиной этого?

При добавлении поваренной соли в воду молекулы воды окружают ионы Na^+ и Cl^-, находящиеся на поверхности кристаллической решетки поваренной соли (рис. 6.4 *а*). Отрицательно заряженная сторона молекул воды окружается ионами Na^+ в кристаллической решетке, а положительно заряженная сторона молекул воды окружается ионами Cl^- и притягивает их кулоновской силой. В результате кристаллическая решетка NaCl разрушается, и в воде образуются ионы Na^+ и Cl^-. Они окружены молекулами воды и перемещаются свободно и беспорядочно.

Электрод, подключённый к положительному полюсу источника питания, называется анодом, а электрод, подключённый к отрицательному полюсу, называется катодом.

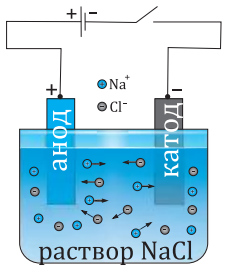
Процесс разделения вещества на положительные и отрицательные ионы в растворах называется электролитической диссоциацией.



а)

Поскольку ионы образуются при электролитической диссоциации, этот процесс также называют генерацией ионов. Выразим процесс генерации на примере раствора поваренной соли в воде следующей реакцией:

$$NaCl \rightarrow Na^- + Cl^-. \qquad (2)$$



б)

Рис. 6.4

Когда переключатель в цепи, показанной выше на рис. 6.3, включён, положительные ионы Na^+ притягиваются к отрицательно заряженному катоду, поэтому положительно заряженные ионы называются ***катионами***. А отрицательные ионы Cl^- притягиваются к положительно заряженному аноду, поэтому отрицательно заряженные ионы называются ***анионами*** (рис. 6.4 *б*). В результате по цепи начинает протекать ток.

Чем больше ионов в электролите, тем лучше он проводит электричество.



Растворы щелочей, кислот, солей и других соединений, проводящих электрический ток в результате диссоциации на ионы, называются электролитами.

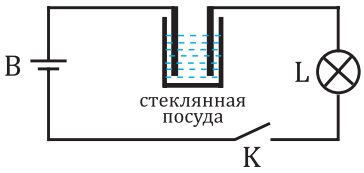
Практическое задание

Цель: изучить прохождение электрического тока через раствор поваренной соли в воде.

Необходимое оборудование: стеклянная ёмкость, дистиллированная вода, поваренная соль, два электрода, лампочка с контактным основанием, батарея 9 V или гальванический элемент, выключатель, соединительные провода.

Порядок выполнения практического задания

1. Соберите электрическую цепь на основе данной принципиальной схемы (см. рисунок).



2. Наполните стеклянный сосуд дистиллированной водой и включите ключ. Понаблюдайте за тем, горит ли лампочка или нет. Затем выключите ключ.

3. Положите немного поваренной соли в сосуд с водой и включите ключ.

Наблюдайте за лампочкой. Затем выключите ключ.

4. Добавьте ещё немного поваренной соли в ёмкость для воды и включите ключ. Наблюдайте за лампочкой. Затем выключите ключ.

5. Повторите пункт 4 ещё один-два раза.

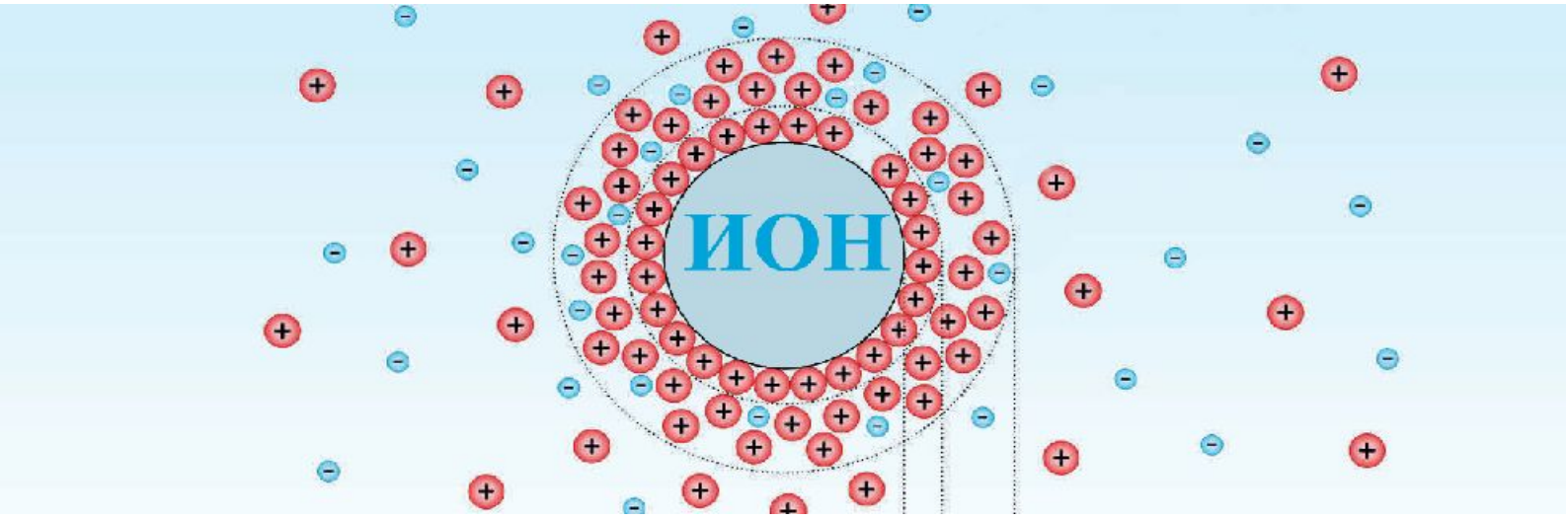
Сделайте вывод по результатам эксперимента.

1. В чём разница между ионом и нейтральным атомом?

2. Происходит ли перенос вещества при ионной и электронной проводимости? Обоснуйте свой ответ.

3. Приведите примеры ионной связи.

4. Все ли вещества, проводящие электричество в жидком состоянии, являются электролитами? Обоснуйте свой ответ.





ПЕРВЫЙ И ВТОРОЙ ЗАКОН ФАРАДЕЯ

ТЕМА 39

1. Явление электролиза.
2. Первый закон Фарадея.
3. Второй закон Фарадея.

Как вы думаете, в чём разница между принципами работы гальванического элемента и батарейки?



В предыдущей теме вы познакомились с образованием электролита и прохождением через него тока. Теперь познакомимся с тем, что происходит при прохождении тока через электролит.

1. Явление электролиза

Возьмём стеклянную ёмкость и нальём в неё дистиллированную воду и соль медного купороса ($CuSO_4$) для образования электролита. Ионы Cu^{2+} и SO_4^{2-} образуются в результате растворения соли сульфата меди в воде и разделения (диссоциации) её молекул на ионы. Ион Cu^{2+} представляет собой ион атома меди, потерявший два электрона на своей внешней электронной оболочке и имеющий 2 положительных элементарных заряда. Ион SO_4^{2-} представляет собой ион сульфата, который присоединил 2 дополнительных электрона и в результате получил 2 отрицательных элементарных заряда. Помещаем два электрода – анод и катод – в электролит и составляем цепь, как показано на рис. 6.6. Если замкнём ключ, амперметр покажет, что через электролит протекает ток.

Положительные ионы Cu^{2+} движутся к катоду, а отрицательные ионы SO_4^{2-} к аноду. Катионы Cu^{2+} подходят к катоду, забирают от него 2 электрона, превращаются в нейтральные атомы Cu и остаются на катоде, то есть происходит реакция $Cu^{2+} + 2e^- \rightarrow Cu$. По мере прохождения тока через электролит атомы меди накапливаются на катоде. Когда анионы SO_4^{2-} достигают анода, молекулы воды, окруженные SO_4^{2-}, отдают свои электроны аноду. При этом молекулы воды разрушаются, и на аноде выделяется газообразный кислород.

Процесс прохождения электрического тока через электролит, сопровождающийся химическими превращениями и выделением чистого вещества на электродах, называется электролизом.

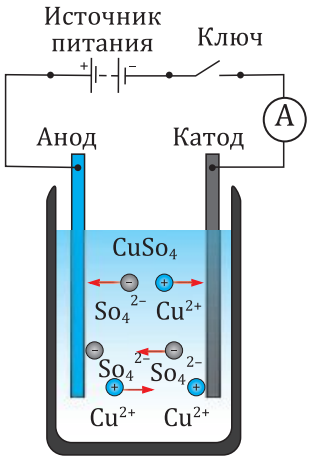


Рис. 6.6

Чистое вещество (металл или газ) можно выделить из смеси, пропуская через электролит электрический ток.

2. Первый закон Фарадея

Опыты, проведённые английским физиком М. Фарадеем, показали, что масса вещества, выделяющегося на электроде при электролизе, зависит от числа ионов, движущихся к электроду, т. е. от величины заряда, прошедшего через электролит.

При электролизе масса вещества, выделяющегося на электроде, прямо пропорциональна количеству заряда, прошедшего через электролит:

$$m \sim q$$



Эта зависимость называется первым законом Фарадея. Выразим это соотношение следующим равенством:

$$m = k \cdot q, \qquad (1)$$

где m – масса вещества, выделившегося при электролизе, q – количество заряда, прошедшего через электролит, k – коэффициент пропорциональности, который называется электрохимическим эквивалентом вещества.

Электрохимический эквивалент вещества – это величина, численно равная массе вещества, выделившегося на электроде при переходе заряда в один кулон из электролита:

$$k = m/q. \qquad (2)$$

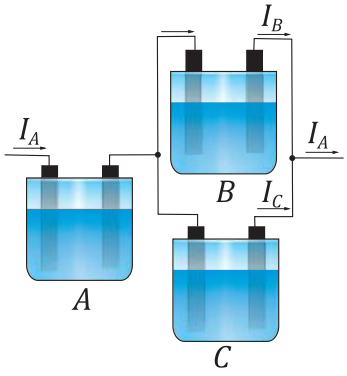


Рис. 6.7

За единицу электрохимического эквивалента в СИ принят [k]=kg/C. Экспериментально определен электрохимический эквивалент различных веществ, например, для серебра k = 1,118 mg/C, для хлора k = 0,367 mg/C, для меди k = 0,329 mg/C, для никеля k = 0,304 mg/C, для алюминия k = 0,094 mg/C.

Выражая количество прошедшего через электролит заряда через силу тока (I) и время прохождения тока (Δt), то есть учитывая, что $q = I \cdot \Delta t$, составим следующее выражение для массы вещества, выделяющегося на электроде:

$$m = k \cdot I \cdot \Delta t. \qquad (3)$$

Первый закон Фарадея можно проверить на основе следующего эксперимента. Три ванны A, B и C заполнены одним и тем же электролитом, а их электроды соединены друг с другом, как показано на рис. 6.7. Согласно рисунку, ток I_A, протекающий через электролитическую ванну A, равен сумме токов I_B и I_C, протекающих через электролитические ванны B и C: $I_A=I_B+I_C$. По формуле (4) масса веществ, выделяющихся при электролизе в электролитических ваннах A, B и C, равна $m_A=m_B+m_C$ при $m_A=kI_A \cdot \Delta t$, $m_B=kIB \cdot \Delta t$ и $m_C=kI_C \cdot \Delta t$. Это подтверждается в эксперименте.

3. Второй закон Фарадея

В серии опытов Фарадей проводил разное количество заряда от разных электролитов. Он открыл второй закон электролиза в 1833-1834 годах по результатам измерения массы вещества, выделяющегося на электродах.

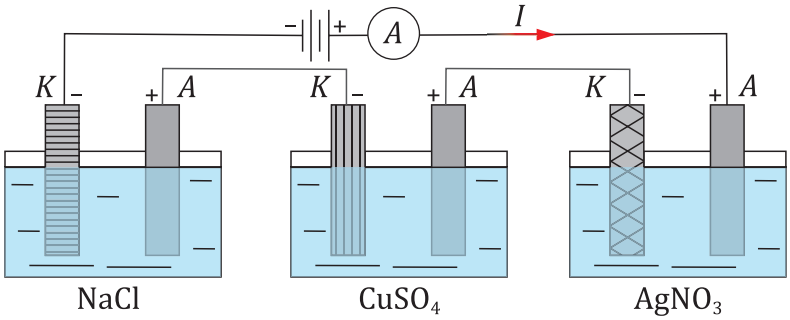


Рис. 6.8

Валентность (Z) – характеристика, указывающая на способность атомов элемента образовать химические связи.

Количество вещества (ν) – физическая величина, выражающая отношение количества частиц (атомов или молекул) одного типа данного вещества к числу атомов в 0,012 kg углерода.



Молярная масса (M) – это масса 1 моля вещества.

Обратимся к экспериментальному устройству. Берём три электролитические ванны и в первую заливаем раствор хлорида натрия (NaCl), во вторую сульфата меди ($CuSO_4$), в третью нитрата серебра ($AgNO_3$). Электроды, погружённые в электролиты, подключаем к источнику тока, соединив их последовательно токопроводящими проводами, как показано на рис. 6.8. При этом на катоде первой ванны выделяется натрий (Na), а на аноде – хлор (Cl_2), на катоде второй ванны – медь (Cu) и на аноде – кислород (O_2), серебро (Ag) на катоде третьей ванны и кислород (O_2) на аноде.

Поскольку ванны соединены последовательно, ток I через каждый электролит одинаков. Значит, количество заряда $q=I\cdot\Delta t$, прошедшего через электролит за время Δt, тоже одинаково. Но массы веществ натрия, меди и серебра, выделяющихся в катодах, различны. Это связано с тем, что молярные массы Na, Cu и Ag и их валентность различны.

Этот эксперимент подтверждает, что при электролизе массы веществ, выделяющихся на катоде в каждой ванне, пропорциональны $\frac{M\ (\text{молярная масса})}{Z\ (\text{валентность})}$.

Масса вещества, выделившегося при электролизе, прямо пропорциональна химическому эквиваленту вещества и количеству прошедшего при электролизе заряда.

Отношение молярной массы вещества к валентности $\left(\frac{M}{Z}\right)$ называется *химическим эквивалентом вещества*.

Химический эквивалент одновалентного вещества численно равен его молярной массе. Второй закон Фарадея выражает связь между электрохимическим эквивалентом вещества и его химическим эквивалентом. Он установил этот закон на основе экспериментов. Второй закон Фарадея определяется как:

Электрохимический эквивалент вещества прямо пропорционален его химическому эквиваленту:

$$k \sim \frac{M}{Z} \text{ или } k = \frac{1}{F}\frac{M}{Z} \qquad (4)$$

Здесь отношение 1/F – коэффициент пропорциональности, постоянный для всех веществ. Величина F в этом выражении называется постоянной Фарадея, а её численное значение равно $F \approx 96500$ C/mol.

Чтобы обобщить законы Фарадея I и II, если заменить k в формуле $m = kq$ его выражением в равенстве (4), образуется следующее уравнение:

$$m = \frac{1}{F}\frac{M}{Z}\cdot q \qquad (5)$$

Согласно выражению (5), при разделении 1 моля одновалентного вещества количество заряда, прошедшего через электролит, должно быть численно равно постоянной Фарадея (96500 кулонов). Для того чтобы в электролит выделился один моль вещества с валентностью Z, через электролит должно пройти $Z\cdot 96500$ кулонов заряда.

Масса вещества, выделяющегося при электролизе, зависит от величины протекающего заряда, молярной массы и валентности атомов вещества.



Пример решения задачи

Сколько времени потребуется для получения 1 g водорода при пропускании тока силой 0,1 A из раствора серной кислоты? Молярная масса водорода (в виде атома) равна 1 g/mol, а его валентность равна 1.

Дано:	Формула:	Решение:
$m = 1\ \text{g} = 1 \cdot 10^{-3}\ \text{kg}$ $M = 1\ \text{g/mol} = 1 \cdot 10^{-3}\ \text{kg/mol}$ $I = 0{,}1\ \text{A}$ $Z = 1$ $F \approx 96500\ \text{C/mol}$ $t = ?$	$m = k \cdot q;\ q = I \cdot t$ $k = \frac{1}{F} \cdot \frac{M}{Z}$ $t = \frac{F}{M} \cdot \frac{Z \cdot m}{I}$	$t = \frac{96500\ \text{C/mol}}{1 \cdot 10^{-3}\ \text{kg/mol}} \cdot \frac{1 \cdot 1 \cdot 10^{-3}\ \text{kg}}{0{,}1\ \text{A}} =$ $= 9{,}65 \cdot 10^{5}\ \text{s} \approx 268\ \text{h}$ **Ответ:** $t \approx 268$ h.

Упражнение 31

1. Как изменится масса вещества, выделившегося на катоде за единицу времени, при увеличении тока, проходящего через солевой раствор в электролитической ванне, в 4 раза?

2. Если при электролизе через раствор $CuSO_4$ прошёл электрический заряд в 100 C, сколько меди выделится на катоде?

3. В электролитическую ванну для цинкования металлических предметов помещают цинковый электрод массой 0,01 kg. Какой заряд должен пройти через ванну, чтобы электрод полностью израсходовался? Электрохимический эквивалент цинка составляет $3{,}4 \cdot 10^{-7}$ kg/C.

4. Плотность тока, проходящего через электролит, составляет $4 \cdot 10^{4}$ A/m^2. Рассчитайте толщину хрома, выделившегося в электролите за 100 с. Плотность хрома $7{,}2 \cdot 10^{3}$ kg/m^3, электрохимический эквивалент $1{,}8 \cdot 10^{-7}$ kg/C.

5. Если всю энергию устройства мощностью 30 kW и напряжением 30 V использовать для электролиза, сколько выделится за 10 минут вещества с электрохимическим эквивалентом $3 \cdot 10^{-7}$ kg/C?

1. Каков физический смысл электрохимического эквивалента вещества?

2. Почему ионы SO_4^{2-} не участвуют в реакции, протекающей на аноде при пропускании электрического тока через раствор соли сульфата меди?

3. Чем обосновывается в опыте тот факт, что масса вещества, выделяющегося при электролизе, прямо пропорциональна молярной массе этого вещества?

4. Как экспериментально проверить, что масса вещества, выделяющегося при электролизе, зависит от валентности этого вещества?



Примеры решения задач

1. Какой заряд должен пройти через раствор соли серебра, чтобы покрыть железную ложку площадью 25 cm^2 серебром толщиной 0,08 mm? Плотность серебра $10{,}5 \cdot 10^3$ kg/m^3.

Дано:	Формула:	Решение:
$S = 25\ cm^2 = 2{,}5 \cdot 10^{-3}\ m^2$ $d = 0{,}08\ mm = 8 \cdot 10^{-5}\ m$ $k = 1{,}118 \cdot 10^{-6}\ kg/C$ $\rho = 10{,}5 \cdot 10^3\ kg/m^3$ $q = ?$	$m = \rho \cdot V = \rho \cdot S \cdot d;$ $m = k \cdot q;$ $q = \frac{\rho \cdot S \cdot d}{k}$	$q = \frac{10{,}5 \cdot 10^3\ \frac{kg}{m^3} \cdot 2{,}5 \cdot 10^{-3}\ m^2 \cdot 8 \cdot 10^{-5}\ m}{1{,}118 \cdot 10^{-6}\ kg/C} \approx 1878\ C$ **Ответ:** $q = 1878$ C.

2. Сколько меди собирается за 2 часа в устройстве для электролиза с полезной мощностью 10 kW, рассчитанном на напряжение 42 V?

Дано:	Формула:	Решение:
$U = 42\ V$ $P = 10\ kW = 10^4\ W$ $t = 2\ h = 7{,}2 \cdot 10^3\ s$ $k = 0{,}329 \cdot 10^{-6}\ kg/C$ $m = ?$	$A = q\ U;\ A = P\ t;$ $q = \frac{Pt}{U};\ m = kq = k\frac{Pt}{U};$	$m = 0{,}32910^{-6}\ kg/C \cdot \frac{10^4\ W \cdot 7{,}2 \cdot 10^3\ s}{42\ V} = 0{,}564\ kg$ **Ответ:** $m = 0{,}564$ kg.

Упражнение 32

1. Если при электролизе продолжительностью 2 часа на катоде собралось 20 mg никеля, какой ток прошёл через электролит при электролизе?

2. Сколько серебра собирается за 2 часа в устройстве для электролиза мощностью 6 kW, рассчитанном на напряжение 12 V?

3. Во время никелирования предмета в течение 3 часов через электролит проходил ток 5 А, толщина никеля была 0,1 mm. Какова площадь покрытая никелем? Плотность никеля равна 8900 kg/m^3.

4. Для покрытия ложки двухвалентным никелем через электролит пропустили ток силой 15 А в течение 20 минут. Найдите массу слоя никеля на ложке.

5. В качестве электролита использовался раствор $CuSO_4$. Определите электрохимический эквивалент меди.

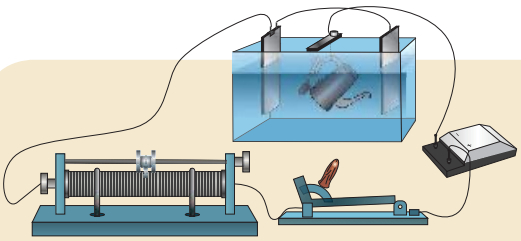
6. Через электролит, состоящий из раствора медного купороса в воде, пропускали заряд 12,5 С. Сколько меди собирается на катоде, погружённом в электролит?



ТЕМА 41

ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОЛИЗА В БЫТУ И В ТЕХНИКЕ

1. Извлечение меди.
2. Гальваностегия.
3. Гальванопластика.



Каким образом поверхность предметов сложной формы покрывается тонким слоем таких металлов, как никель, серебро, золото?

1. Извлечение меди

Чистая медь широко используется в электротехнике. Важно, чтобы медь обладала высокой электропроводностью. Однако введение в состав меди небольших количеств других веществ приводит к снижению её электропроводности. Чистую медь отделяют от различных соединений следующим методом.



Рис. 6.9

Электролитическая ванна большого объёма заполняется раствором медного купороса. В него параллельно опускают тонкие пластины из чистой меди (рис. 6.9). Такие пластины из чистой меди, соединённые с отрицательным полюсом источника электричества, служат катодами. Толстые анодные пластины опускаются параллельно между катодами. Пластины, выполняющие роль анодов, изготавливаются из нерафинированной меди. Со временем катодные пластины становятся толще, а анодные пластинки тоньше. Толстая пластина, извлечённая из ванны, состоит из чистой меди.

Помимо меди электролизом получают также такие металлы, как алюминий, магний, натрий, калий и кальций. Самым популярным из них считается алюминий. Если бы алюминий получали лабораторными методами, он был бы таким же дорогим, как золото.

2. Гальваностегия

В результате поверхностного окисления изделия из железа быстро ржавеют. Ржавчина постепенно разъедает металл и вызывает появление отверстий. Обычно поверхность предметов из легко окисляемых металлов покрыта тонким слоем, других трудно окисляемых металлов, в том числе никеля, цинка, серебра, золота. В быту мы часто используем никелированные ложки, ножи и чайники.



Покрытие поверхности предметов трудноокисляемыми металлами с помощью электролиза называется гальваностегией.

При пропускании тока через электролитическую ванну, показанную на рисунке 6.10 в течение определённого времени, поверхность изделий покрывается слоем серебра. Для нанесения серебра на поверхность изделия в качестве электролита берётся раствор солей серебра, в качестве анода – серебряная пластина. При золочении в качестве электролита используют раствор солей золота, а в качестве анода используют золотую пластину.

3. Гальванопластика

С помощью электролиза можно получить точные копии поверхностей и предметов сложной формы. Например, необходимо получить копию рисунка, вырезанного на доске. Для этого на узорчатую часть доски очень тонко наносится графит, в результате чего эта часть становится токопроводящей. Подготовленную доску опускают в раствор медного купороса. Графитовый проводник на поверхности платы соединён с отрицательным полюсом источника тока через провод, то есть графитовый слой выполняет роль катода. В качестве анода используется медная пластина, опущенная в электролит. После покрытия графита медным слоем достаточной толщины процесс электролиза останавливают и медный слой отделяют от доски. В этом случае форма медного слоя выглядит как изображение-негатив узора доски. Глубокие области на плате станут выпуклыми на медном негативе, а выпуклые области станут вогнутыми. Изображение-негатив используют как форму для создания действительного изображения узора.

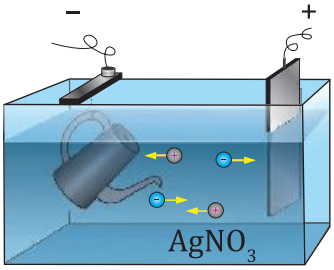


Рис. 6.10



Полученное таким образом изображение-негатив называется матрицей. (Матрица – латинское слово, означающее мать). Матрица – это форма, используемая в типографии для литья копий букв, изготовления медалей, монет, штампов.

Покрытие металлами поверхностей предметов электролитическими методами для придания им формы называется гальванопластикой.



1. Может ли чистая медь, полученная электролизом, содержать атомы других веществ? Обоснуйте свой ответ.

2. Почему поверхность посуды покрывается трудно окисляемыми металлами?

3. Можно ли использовать водный раствор кислоты или щёлочи в качестве электролита в гальваностегии?

4. Какие металлы следует использовать для гальванопластики?



ТЕМА 42

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ГАЗАХ

1. Электрический разряд в газах.
2. Ионизация газов.
3. Виды газовых разрядов.



В чём разница между молнией и грозой? Почему молния обычно бьёт в верхние части многоэтажных зданий?

Процесс прохождения электрического тока через газ называется газовым разрядом.

В нормальных условиях газ не проводит электричество, то есть считается диэлектриком. Под действием нагрева, сильного излучения, электрического поля газ превращается в среду, проводящую электрический ток.

Чем отличается протекание электрического тока в газах от протекания тока в металлах и электролитах? Какие частицы являются переносчиками электричества в газах? Как можно использовать явления прохождения тока через газы в повседневной жизни? В этой теме найдем ответы на эти вопросы.

1. Электрический разряд в газах

Возьмём плоский воздушный конденсатор, соединим его пластины с электрометром и зарядим конденсатор (рис. 6.11 *а*). При этом показание стрелки электрометра со временем почти не меняется, т. е. заряд на покрытиях конденсатора не уменьшается. Это свидетельствует о том, что электрический заряд не проходит по воздуху между обкладками конденсатора. Итак, сухой воздух можно считать диэлектриком при комнатной температуре. Зажжём свечу и нагреем воздух между обкладками конденсатора. Сразу же показания электрометра начинают уменьшаться, т. е. обкладки конденсаторов разряжаются (рис. 6.11 *б*).

Причиной этого является протекание электрического заряда через воздух между обкладками конденсатора. Итак, по нагретому воздуху течёт ток. Нагретый воздух становится проводником.

2. Ионизация газов

Атмосфера состоит из смеси различных типов газов, а воздух в нижнем слое атмосферы содержит по объёму азот (N_2) ~ 78,08 %, кислород (O_2) ~ 20,94 %, аргон (Ar) ~ 0,93 %, в том числе присутствуют и др. газы, углекислый газ (CO_2), неон (Ne), гелий (He), криптон (Kr), водород (H_2) и водяной пар (H_2O). При комнатной температуре все атомы и молекулы воздуха находятся в нейтральном состоянии. При нагревании воздуха нейтральные атомы и молекулы ионизируются. Посмотрим, как происходит этот процесс на примере инертного газа аргона. 18 электронов вращаются вокруг ядра атома аргона. Аргон имеет 8 электронов на внешней электронной оболочке атомов, которая представляет собой полную (насыщенную) оболочку (рис. 6.11 *в*). Ядро и оболочка атома аргона имеют заряды +18e и –18e соответственно. Отдельные атомы Ar электрически нейтральны. При нагревании энергия электронов внешней элек-



тронной оболочки атома Ar увеличивается, и один из них покидает атом: $Ar^{\circ} \rightarrow Ar^{+} + e^{-}$. Атом Ar, потерявший один электрон, превращается в положительный ион Ar+ (рис. 6.13 *г*). Некоторые нейтральные атомы захватывают электрон и становятся отрицательными ионами: $Ar^{\circ} + e^{-} \rightarrow Ar^{-}$. Таким образом, в газе появляются положительные, отрицательные и свободно движущиеся электроны.

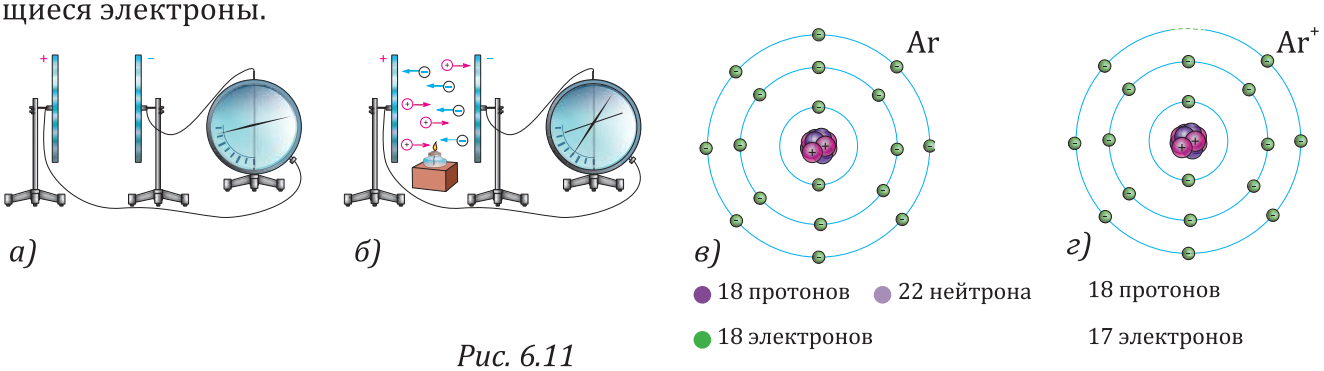


Рис. 6.11

При нагревании воздуха между обкладками конденсатора, показанного на рис. 6.11 *б*, положительные ионы, образованные подобно ионам Ar+, движутся к отрицательно заряженным обкладкам конденсатора под действием электрического поля, а отрицательные ионы и свободные электроны, отделившиеся от атомов, движутся к положительно заряженной обкладке конденсатора. В результате через воздух проходит ток. Поэтому для создания электрического тока в газах необходимо приложить к газу внешнее электрическое поле, чтобы ионизовать его атомы или молекулы и заставить образовавшиеся ионы и свободные электроны двигаться упорядоченно.

С одной стороны, участие ионов в электропроводности газов аналогично электропроводности электролитов, а с другой стороны, участие электронов аналогично электропроводности металлов. Электропроводность газов состоит из упорядоченного движения положительных и отрицательных ионов и свободных электронов. В результате соединения свободных электронов и положительных ионов в газе могут образовываться и нейтральные атомы. При прекращении внешнего воздействия, ионизирующего газ, за счёт рекомбинации заряженных частиц ионы в газе превращаются в нейтральные частицы, и газ снова становится диэлектриком. Атомы газа можно ионизировать не только при нагревании, но и при воздействии света или сильного электрического поля. Внешний источник, который ионизирует атомы или молекулы газа без электрического поля, называется внешним ионизатором.

Процесс образования нейтральных атомов в результате присоединения электронов и положительно заряженных ионов называется рекомбинацией зарядов в газах.

Под действием нагрева, сильного излучения и электрического поля в газе образуются положительные и отрицательные ионы и свободные электроны. Они являются частицами – переносчиками электрического заряда в газах.

3. Виды газовых разрядов

По характеру газового разряда их делят на несамостоятельные и самостоятельные.

Несамостоятельный разряд возникает в электрических полях с малой напряжённостью электрического поля, а самостоятельный разряд возникает в электрических полях с высокой напряженностью электрического поля.



Газовый разряд, существующий только под действием внешнего ионизатора и гаснущий при его воздействии, называется несамостоятельным разрядом, а газовый разряд, существующий и без воздействия внешнего ионизатора, называется самостоятельным разрядом.

По условиям возникновения газового разряда самостоятельный разряд проявляется в нескольких формах: тлеющий, искровой, коронный, дуговой.

Тлеющий разряд. Берём закрытую стеклянную трубку и устанавливаем внутри неё два электрода – анод и катод. На электроды подаём напряжение в несколько сотен вольт. При давлении воздуха в трубке, равном атмосферному давлению ($\sim 10^5$ Pa), через газ не проходит электрический ток. Когда постепенно откачиваем воздух из трубки с помощью насоса и уменьшаем давление газа в 10 раз ($\sim 10^4$ Pa), замечаем газовый разряд, и через газ начинает проходить ток. При уменьшении давления газа в 20 раз ($\sim 5 \cdot 10^3$ Pa) между катодом и анодом появляется светящийся шнур. При снижении давления в 250–350 раз (~300–400 Pa) тлеющий свет охватывает весь объём трубки между электродами. Поэтому такой разряд называется тлеющим разрядом.

При тлеющем разряде плотность тока, проходящего через газ, составляет около 1-5 mA/cm^2. Разные газы дают тлеющий разряд разного цвета (рис. 6.12 *а*). Тлеющий разряд применяют в ночных рекламных щитах (рис. 6.12 *б*).

Искровой разряд. Возьмём два электрода, отделённых друг от друга в воздухе, и подключим их к источнику высокого напряжения. Если увеличить напряжение, то при определённом его значении между электродами появляется вспышка (рис. 6.15). Такая вспышка называется искровым разрядом. Во время искрового разряда слышен треск и излучается яркий свет.

В нормальных условиях искровой разряд возникает, когда напряжённость электрического поля достигает 30 000 V/cm между электродами в воздухе.

Искровой разряд возникает в природе между облаками (рис. 6.16) или между облаком и земной поверхностью (рис. 6.15) в виде молнии. Напряжение между облаками может превышать 100 000 000 V. Во время молнии ток, проходящий по воздуху между такими облаками, достигает 10 000 A. Длительность искрового разряда находится в пределах 1÷20 ms.



а)



б)

Рис. 6.12

Коронный разряд. Коронный разряд формируется вокруг остроконечных электродов, напряжённость электрического поля которых резко меняется (рис. 6.16). Коронный разряд в природе можно наблюдать вокруг острых металлических предметов, установленных на крышах высотных зданий во время грозы

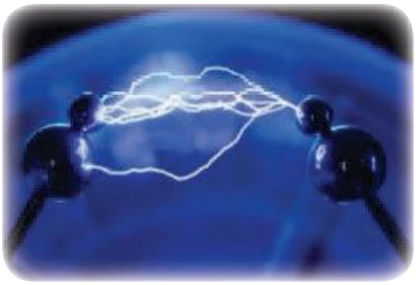


Рис. 6.13



Рис. 6.14



Рис. 6.15



или штормового дня (рис. 6.17), острых частей мачты корабля, плавающего в море (рис. 6.18), остроконечных частей самолёта при полёте (рис. 6.19).

Коронный разряд можно наблюдать не только вокруг острых электродов, но и вокруг токопроводящих проводов, установленных на высоковольтных линиях электропередач. Главное усло-



Рис. 6.16



Рис. 6.17



Рис. 6.18

вие возникновения коронного разряда: напряжённость электрического поля, создаваемая вокруг острого конца электрода, должна иметь значительно большее значение, чем остальная среда вокруг электродов. В нормальных для воздуха условиях вокруг острого конца электрода начинает формироваться коронообразное свечение, начиная со значения напряжения 30 000 V/cm. В таком разряде процесс ионизации характеризуется тем, что он происходит только вблизи коронирующего электрода, а во втором электроде коронный разряд не формируется.

Дуговой разряд. Возьмем два угольных электрода и подадим на них напряжение 40-50 V. Прикоснемся их концами друг к другу, а затем переместим немного дальше. При этом между концами электродов образуется ослепительное свечение – дуговой электрический разряд (рис. 6.20).

Электрический дуговой разряд является очень мощным источником света. Такие электрические дуги применяют в прожекторах, маяках, проекционных устройствах (рис. 6.21) и др. Поскольку температура дугового разряда очень высока, его применяют для плавки и сварки металлов (рис. 6.22). Мощная электрическая дуга используется для получения высококачественной стали.



Рис. 6.19



Рис. 6.20

Прохождение электрического тока через газ называется газовым разрядом. В зависимости от условий образования газовый разряд делится на два вида: самостоятельный и несамостоятельный. Самостоятельные газовые разряды проявляются в нескольких формах: тлеющий, искровой, коронный, дуговой.

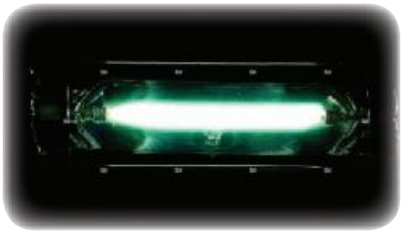


Рис. 6.21



Рис. 6.22



Пример решения задач

Плоский конденсатор подключён к источнику напряжением 6 kV. При каком расстоянии между пластинами произойдет пробой, если ударная ионизация воздуха начинается при напряжённости поля 3 MV/m?

Дано:	Формула:	Решение:
$U = 6\ \text{kV} = 6 \cdot 10^3\ \text{V}$ $E = 3\ \text{MV/m} = 3 \cdot 10^6\ \text{V/m}$	$E = \frac{U}{d}$ $d = \frac{U}{E}$	$d = \frac{6 \cdot 10^3\ \text{V}}{3 \cdot 10^6\ \text{V/m}} = 2 \cdot 10^{-3}\ \text{m} = 2\,\text{mm}$
$d = ?$		**Ответ:** $d = 2$ mm.

Упражнение 33

1. Стеклянная трубка с электродами заполнена разрежённым газом аргоном. Для ионизации атома аргона энергия ударяющего по нему электрона должна быть ≈ $2{,}5 \cdot 10^{-18}$ J. Какую разность потенциалов должен пролететь электрон, движущийся под действием приложенного к электродам напряжения, чтобы ионизировать атом Ar?

2. Длительность молнии 1 ms, количество переносимого заряда за одну вспышку 20 C, напряжение 2 GV. Какова сила тока и мощность молнии в одной вспышке? Сколько энергии выделится, если молния состоит из 5 вспышек?

3. При кратковременной грозе в пасмурный день ток газового разряда в воздухе достигал $5 \cdot 10^3$ A. Найдите продолжительность разряда молнии, если количество переданного заряда равно 6 C.

4. Сколько ампер будет иметь анодный ток, если $4 \cdot 10^{16}$ электронов ежесекундно достигают анода за счёт напряжения, приложенного к катодному и анодному электродам, находящимся в вакууме?

1. Объясните природу возникновения электрического тока в газах.

2. Какими способами можно ионизовать атомы или молекулы газа?

3. Для каких целей используется газовый разряд в быту и технике?

4. Объясните природу несамостоятельных и самостоятельных разрядов.

5. Подчиняется ли газовый разряд закону Ома? Обоснуйте своё мнение.



ТЕМА 43
ПОЛУПРОВОДНИКИ И ИХ ОТЛИЧИЕ ОТ МЕТАЛЛОВ

1. Отличие полупроводников от металлов.
2. Полупроводниковые вещества.



1. Почему сопротивление металлов увеличивается при повышении температуры?
2. Как думаете, в чём причина уменьшения сопротивления полупроводников при повышении температуры?

Для того чтобы знать природу электропроводности полупроводниковых веществ, необходимо знать, что это за вещества, какова их структура, из чего состоят частицы-переносчики тока и от чего зависит их электропроводность.

1. Отличие полупроводников от металлов

Есть такие вещества в природе: при нормальных условиях в них концентрация свободных электронов, несущих заряд, то есть число свободных электронов в единице объёма, очень мала по сравнению с проводниками, но очень велика по сравнению с диэлектриками (изоляторами). Поэтому их электропроводность намного меньше, чем у проводников, но гораздо больше, чем у диэлектриков. Такие вещества называются *полупроводниками*. Полупроводниковые вещества отличаются от металлов по характеру и свойствам электропроводности. Внешние воздействия, например, нагрев, воздействие света или внедрение в структуру атомов других химических элементов, могут резко изменить электропроводность полупроводников. Электропроводность металлов очень чувствительна к таким воздействиям. Различные электронные устройства, в том числе диоды, транзисторы, микросхемы, элементы управления, терморезисторы, фотоэлементы, фотодатчики, фоторезисторы, светодиоды и подобные устройства изготавливаются с использованием полупроводников в связи с их высокой чувствительностью к внешним воздействиям.

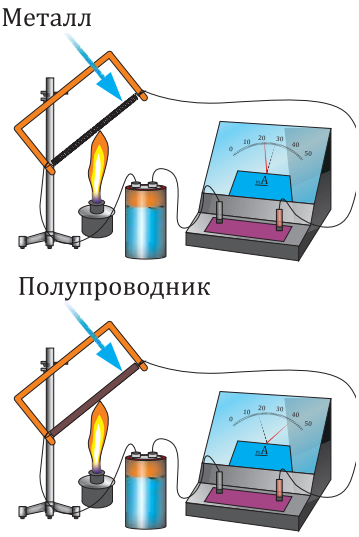


Рис. 6.23

Проверить зависимость электропроводности металлов и полупроводников от температуры можно с помощью устройства, изображенного на рис. 6.23. Для этого к аккумулятору через миллиамперметр подключаем металлические проводники и полупроводники и нагреваем их. Когда нагреваем металл, показание миллиамперметра в цепи уменьшается, а когда нагреваем полупроводник, показание миллиамперметра увеличивается. Так, при нагреве электропроводность металла уменьшается, а полупроводника увеличивается.



2. Полупроводниковые вещества

В настоящее время одним из наиболее широко используемых материалов в производстве полупроводниковых электронных устройств является кремний. Потому что кремний широко распространен в природе и составляет ~27,6% земной коры. При этом кремний не является токсичным веществом, легко поддается технологической обработке.

На основе полупроводниковых материалов разрабатываются компьютеры, мобильные телефоны, смартфоны, электронные часы, лазеры, радиоприёмники, телевизоры и электронные устройства управления, используемые в быту. Развитие современной техники невозможно представить без полупроводниковых материалов.

Практическое задание

Цель: изучить работу полупроводникового фотоэлемента.

Необходимое оборудование: фотоэлемент, миллиамперметр, источник света, разноцветные бутылки, соединительные провода.

Порядок выполнения работы

1. Установите фотоэлемент на основание и подключите его к миллиамперметру с помощью соединительных проводов (смотрите на рисунок). Обратите внимание на совместимость полюсов «+» и «-» зажимов миллиамперметра с зажимами фотоэлемента.

2. Включите фонарик (источник света) и осветите поверхность фотоэлемента.

3. Осветите поверхность фотоэлемента сильным и слабым световыми лучами и наблюдайте за показаниями миллиамперметра.

4. Осветите фотоэлемент лучами разного цвета (для этого на пути света можно поставить стёкла разного цвета), наблюдать за показаниями миллиамперметра.

Сделайте вывод по результатам эксперимента.







цветные стёкла

1. Как изменяется электрическое сопротивление полупроводника при повышении температуры? Обоснуйте свой ответ.

2. Чем полупроводники отличаются от металлов по электрическим свойствам?

3. Из-за каких свойств некоторые вещества называются полупроводниками?



ТЕМА 44

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОВОДИМОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

1. Электронная проводимость.
2. Дырочная проводимость.
3. Полупроводники с примесями.

Электропроводность полупроводника зависит от его формы, размера, типа вещества, температуры и света.



1. Электронная проводимость

Ковалентные связи в атоме кремния являются сильными, и при низких температурах электроны в них окружены атомами. Поэтому при низких температурах в кремнии почти отсутствуют свободные электроны, и в результате кремний не проводит электричество. При повышении температуры кинетическая энергия электронов в ковалентных связях увеличивается. Некоторые ковалентные связи начинают разрываться.

Электроны отделяются от атома и становятся свободно движущимися электронами (рис. 6.24). Свободные электроны принадлежат не конкретному атому, а всей кристаллической решётке и могут свободно перемещаться по всему объёму. В отсутствие электрического поля свободные электроны хаотично перемещаются по объёму. Если к кремнию приложено внешнее электрическое поле, то под действием поля происходит упорядоченное перемещение свободных электронов и возникает электрический ток (рис. 6.34). Возникновение тока за счёт перемещения свободных электронов в полупроводниках называется электронной проводимостью или проводимостью n-типа (лат. negativus – отрицательный).

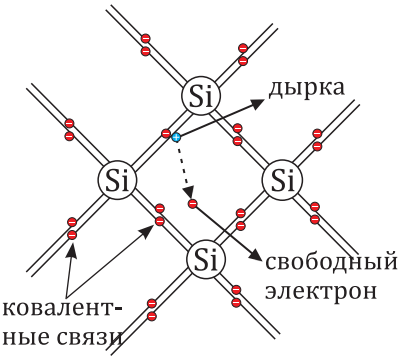


Рис. 6.24

2. Дырочная проводимость

В результате удаления одного из пары электронов в ковалентной связи кремния образуется пустое пространство - дырка (рис. 6.24). Дырка, образованная потерей отрицательно заряженного электрона из нейтрального атома, приобретает положительный заряд. Величина заряда дырки (q_p) равна величине элементарного заряда: q_p=1,6·10^{-19}Кл. Таким образом, дырка – это свободное пространство, которое может занять электрон в ковалентной связи полупроводника. Новообразованная дырка заполняется электроном от другой ковалентной связи, и дырка движется. Таким образом, дырка движется по всему объёму полупроводника. В отсутствие электрического поля это перемещение дырок происходит неравномерно. Когда к полупроводнику приложено внешнее электрическое поле, дырки движутся в направлении поля и генерируют электрический ток (рис. 6.25). Электропроводность с дырками в полупроводниках называется дырочной проводимостью или проводимостью *p*-типа (лат. positivus — положительная).

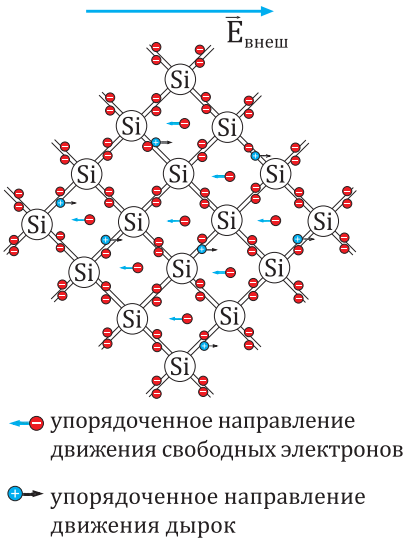


Рис. 6.25

Частицами, несущими заряд в полупроводниках, являются электроны и дырки.

Значит, чистые (без каких-либо примесей) полупроводники имеют электронную проводимость, связанную с движением



свободных электронов, и дырочную проводимость, связанную с движением дырок. В чистых полупроводниках при образовании одного свободного электрона образуется одна дырка. Поэтому количество свободных электронов в чистых полупроводниках равно количеству дырок.

Сила тока, проходящего через полупроводник (I), равна сумме сил токов, создаваемых электронами ($I_э$) и дырками ($I_д$):

$$I = I_э + I_д \qquad (1)$$

Из-за малого количества свободных электронов и дырок в чистых полупроводниках их электропроводность невелика.

Электропроводность в чистом полупроводнике без примесей называется собственной проводимостью.

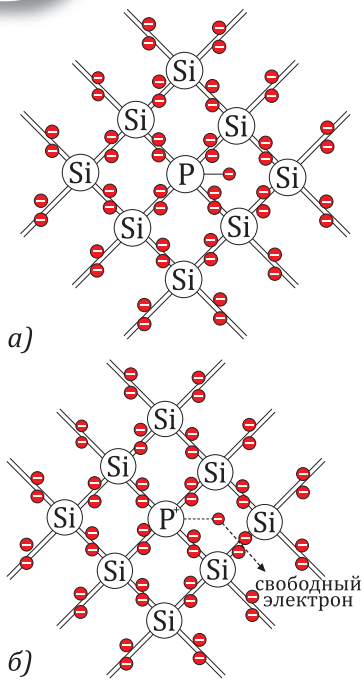


Рис. 6.26

Примесные полупроводники

Донорные примеси. Теперь добавим к чистому кремнию примеси. Сначала введём в кристаллическую решётку кремния атомы элемента фосфора (P), находящегося в пятой группе периодической таблицы химических элементов. Атом фосфора имеет 5 валентных электронов на внешней электронной оболочке. Когда атом фосфора внедряется в кристаллическую решётку кремния, он располагается в узле решётки и образует насыщенные ковалентные связи с 4 соседними атомами кремния (рис. 6.26, *а*). В этом участвуют 4 валентных электрона фосфора, а пятый электрон остается свободным, не участвуя в химической связи, и покидает атом. Этот электрон становится свободным электроном, движущимся по всему объёму (рис. 6.26 *б*). Атом фосфора, потерявший один электрон, становится положительным ионом. Ионы фосфора находятся в прочной ковалентной связи с атомами кремния, поэтому не перемещаются с места на место и не участвуют в прохождении тока. Следовательно, такие примесные атомы производят только свободные электроны. Если включить в структуру кристаллической решётки много атомов фосфора, то количество свободных электронов в кремнии резко увеличится по сравнению с количеством дырок. И сопротивление полупроводника резко уменьшается.

Примесь, которая отдает электрон при добавлении в полупроводник, называется донорной примесью.

Атомы *V* группы периодической таблицы химических элементов (P, As, Sb, Bi) выступают донорным соединением для кремния и германия. Поскольку основными ток несущими частицами в полупроводниках с донорным соединением являются электроны, их называют полупроводниками *n*-типа.

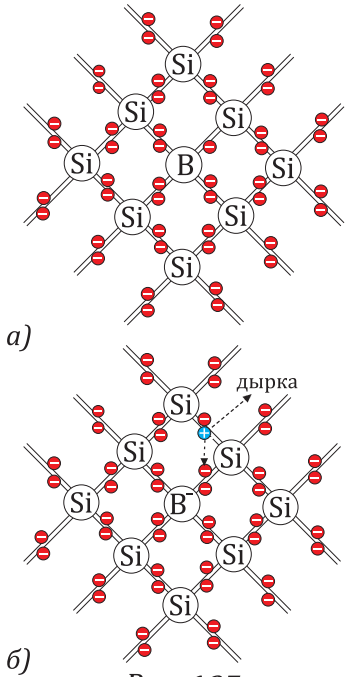


Рис. 6.27

Акцепторные примеси. Введём атомы элемента бора (B) в чистый кремний. Элемент бора находится в III группе периодической таблицы, а внешняя электронная оболочка атома имеет 3 валентных электрона. Когда атом бора вводится в кристаллическую решётку кремния, он располагается в узле решётки и образует ковалентную связь с 4 соседними атомами кремния. Но для того,



чтобы все связи были насыщены парой электронов, атому бора не хватает одного электрона (рис. 6.27 *а*). Он забирает недостающий электрон у атомов кремния, окружающих атом бора. В результате в атомах кремния образуется дырка (рис. 6.27 *б*). Атом бора, присоединенный к одному электрону, становится отрицательным ионом. Такие ионы, находящиеся в узлах кристаллической решётки, не участвуют в переносе заряда, так как не движутся. Поэтому атомы бора только увеличивают количество дырок, а количество свободных электронов остается неизменным. Чем больше атомов бора добавляется к кремнию, тем больше образуется дырок.

Примеси, которые при внедрении в полупроводник создают дырочную проводимость, называются акцепторными примесями.

Атомы III группы периодической таблицы химических элементов (B, Al, Ga, In) выступают акцепторным соединением для кремния и германия. В полупроводниках с акцепторной примесью дырок больше, чем свободных электронов. Поэтому в таких полупроводниках дырки являются основными частицами, несущими заряд, а электроны – неосновными частицами, несущими заряд. Сложные полупроводники, в которых основными носителями заряда являются дырки, называются полупроводниками *p*-типа.

Управлять электропроводностью полупроводников можно, добавляя атомы различных химических элементов.

Практическое задание

Цель: изучить зависимость электрического сопротивления полупроводника от температуры.

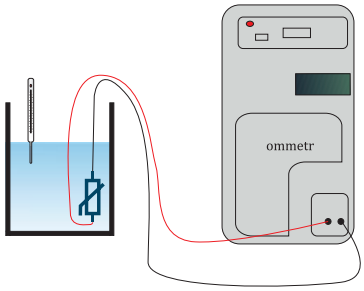
Необходимое оборудование: терморезистор (полупроводниковый), омметр, стеклянная ёмкость, термометр, соединительные провода.

Порядок выполнения работы

1. Налейте немного воды в стеклянную ёмкость. Опустите термометр и термисторы в воду.
2. Подсоедините термистор к омметру.
3. Наблюдайте за показаниями термометра и омметров.
4. Наливайте в стеклянную ёмкость постепенно горячую воду, затем наблюдайте, как изменяются показания термометра и омметра при повышении температуры.
5. Замените воду в стеклянной ёмкости холодной водой.
6. Замените термистор в стеклянной ёмкости металлическим проводником (например, спиралью нагревательной плиты).
7. Добавьте к воде в стеклянной ёмкости горячую воду и наблюдайте, как изменяются показания термометра и омметров по мере нагревания воды.

Напоминание. Проводите опыт медленнее, чтобы температура полупроводника и металлических проводников сравнялась с температурой воды в стеклянной ёмкости.

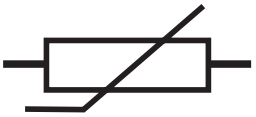
Сделайте вывод по результатам эксперимента.



омметр



терморезистор



обозначение терморезистора



ТЕМА 45

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В ТЕХНИКЕ

1. p-n переход в полупроводниках.
2. Полупроводниковый диод.
3. Понятие о транзисторе.
4. Интегральные микросхемы.



Работают ли полупроводниковые приборы одинаково в жару и холод?

В настоящее время основные элементы электроники и радиодеталей производятся на основе полупроводниковых материалов. Как работают такие элементы? Каково строение деталей, осуществляющих в них электронные процессы? Именно на таких вопросах и сосредоточимся в этой теме.

1. p-n переход в полупроводниках

Создадим область проводимости *n*-типа в одной части твёрдого полупроводникового кристалла, а область проводимости *p*-типа в другой части (рис. 6.28). Свободные электроны заполняют дырки на границе, где соединяются *p*- и *n*-области, то есть происходит электронно-дырочная рекомбинация. В результате в этой части полупроводника образуется область практически без носителей заряда, свойства которой аналогичны свойствам диэлектрика. Эта область препятствует переходу свободных электронов в *p*-область, а дырок в *n*-область. Поэтому эта область называется запирающим слоем. Отрицательно заряженные акцепторные атомы, которые не могут свободно двигаться в области, соответствующей полупроводнику *p*-типа, и положительно заряженные донорные атомы в области, соответствующей полупроводнику *n*-типа, создают внутреннее электрическое поле (E внутр) в герметизирующем слое. Силовые линии внутреннего электрического поля направлены от полупроводника n-типа к полупроводнику p-типа (рис. 6.28).

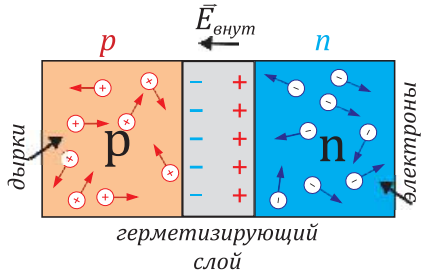


Рис. 6.28

Подключим этот полупроводник к источнику тока. Сначала подключим *p*-область полупроводника к отрицательному полюсу источника, а *n*-область к положительному полюсу источника (рис. 6.29 *а*). При этом электроны притягиваются к положительному полюсу, а дырки – к отрицательному полюсу. В результате запирающий слой расширяется и его сопротивление увеличивается. Через полупроводник почти не протекает ток. Такая ситуация называется обратным *p-n* переходом.

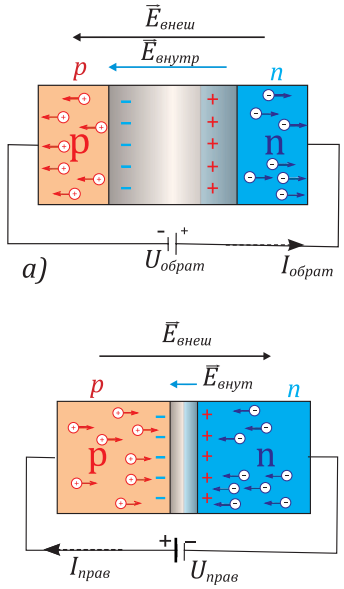


Рис. 6.29

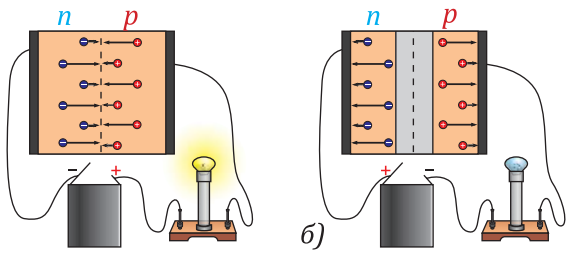


Рис. 6.30



Теперь подключим положительный полюс источника тока к *p*-участку полупроводника, а отрицательный полюс к *n*-участку. В этом случае электроны отталкиваются от отрицательного полюса источника тока и притягиваются к *p*-области, соединенной с положительным полюсом. А дырки отталкиваются от положительного полюса и притягиваются к *n* области. В результате запирающий слой сужается, его сопротивление уменьшается, и через него начинает проходить ток (рис. 6.29 *б*). Такая ситуация называется прямым *p-n* переходом. В прямом *p-n*-переходе электрическое сопротивление полупроводника в десятки, а иногда и в сотни раз меньше, чем в обратном *p-n*-переходе. В полупроводнике с *p-n* переходом электрический ток может протекать только в одном направлении по схеме, показанной на рис. 6.30. На рис. 6.30 *а p-n* переход подключён в правильном направлении, а наличие тока в цепи определяем по лампочке. На рис. 6.30 *б p-n* переход подключён в обратном направлении, и можем видеть, что ток через полупроводник не течёт, по тому факту, что лампочка не горит.

Свойство односторонней передачи электрического тока полупроводников с *p-n* переходом используется в полупроводниковых приборах.

Структура с p-n переходом имеет свойство односторонней передачи тока.

2. Полупроводниковый диод

Для образования p-n перехода в полупроводниках недостаточно механически соединить два полупроводника с *p-* и *n*-типом проводимости. Потому что в этом случае расстояние между ними будет большим. Толщина между *p* и *n* областями должна быть достаточно малой, сравнимой с межатомным расстоянием. Для этого возьмём твердый полупроводник *n*-типа с донорной примесью, например, монокристалл германия (*n*-Ge). Помещаем небольшой кусочек элемента III группы периодической таблицы химических элементов, например, индия (In), который создает на германии *p*-тип проводимости (рис. 6.31 *а*). Затем нагреваем в условиях вакуума в интервале температур 400-500°C (температура плавления In 157°C, а температура плавления Ge равна 938°C). При охлаждении образца вокруг области контакта германия с In образуется слой германия *p*-типа (*p*-Ge) за счёт проникновения атомов In в монокристалл германия (рис. 6.31 *б*). Область монокристалла германия, куда не входят атомы индия, по-прежнему будет иметь *n*-тип проводимости. В результате между слоями *p*-Ge и *n*-Ge образуется область *p-n* перехода (рис. 6.31 *б*).

Полупроводниковый прибор с одним p-n переходом называется полупроводниковым диодом.

Для уменьшения воздействия света, воздуха и внешних электрических и магнитных полей на полупроводниковый диод кристалл германия помещают в герметичную металлическую оболочку (рис. 6.31 *в*).

Условное обозначение полупроводникового диода показано на рис. 6.31 *г*.

Полупроводниковый диод – это электронное устройство с *p-n* переходом, проводящим ток в одном направлении.

Полупроводниковый диод — это электронное устройство с p-n переходом, проводящим ток в одном направлении.

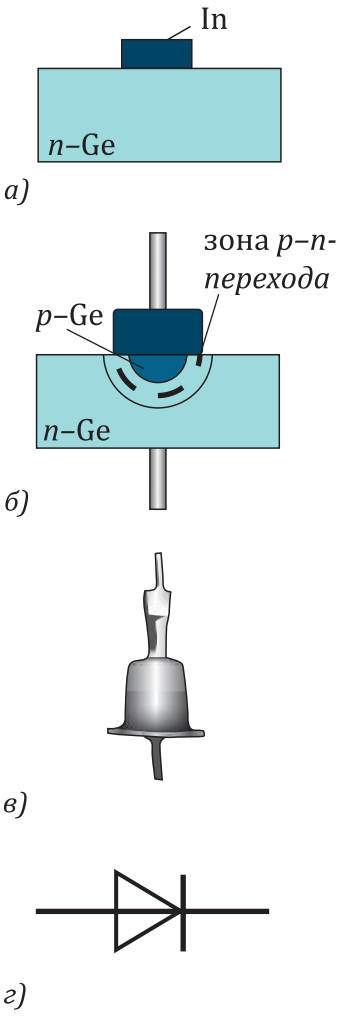


Рис. 6.31



3. Понятие о транзисторе

Полупроводниковую систему с двумя *p-n* переходами можно рассматривать как транзистор. Переменные электрические сигналы усиливаются, электрические колебания генерируются и управляются с помощью транзистора.

Чтобы создать транзистор, индий припаивают к противоположным сторонам кристалла германия, имеющего электронную проводимость. Слои *p*-Ge формируются на двух сторонах *n*-Ge путём нагревания в вакууме, аналогично приготовлению полупроводникового диода. Толщина кристалла германия очень мала (несколько микрометров). Этот слой называется **базой** транзистора (рис. 6.32 *а*). Два его конца, имеющие полостную проводимость, называются *эмиттером* и *коллектором*. Транзистор такого типа называется транзистором со структурой *p-n-p* (рис. 6.32 *а*).



Рис. 6.32

Транзистор представляет собой трёхэлектродное (эмиттер, база, коллектор) электронное устройство, состоящее из двух p-n переходов, выполняющее задачи формирования, усиления и управления электрическими сигналами.

Концентрация дырок в эмиттерной области транзистора сделана в несколько раз больше, чем концентрация свободных электронов в базе. Условное обозначение транзистора *p-n-p* структуры показано на рис. 6.32 *б*. Для предотвращения внешних воздействий транзисторы защищают снаружи различными корпусами (рис. 6.32 *б*).

Познакомимся с работой транзистора (рис. 6.33). Напряжение батареи B_1, подключённое к промежутку между эмиттером и базой, образует прямой *p-n* переход и создаёт эмиттерный ток ($I_э$). Батарея B_2 в промежутке база-коллектор образует обратный p-n переход. Как тогда генерируется ток в коллекторе? Дырки попадают в базу за счёт напряжения, приложенного к промежутку, эмиттер-база. Из-за того, что толщина базы очень мала и концентрация свободных электронов в ней невелика, лишь небольшая часть дырок соединяется с электронами и становится нейтральной. Большая часть дырок перейдет в коллекторную область.

Поскольку отрицательный полюс батареи B_2 соединен с коллектором, дырки притягиваются к нему, создавая коллекторный ток ($I_к$). Ток в цепи эмиттер-база ($I_б$) намного меньше, чем ток в направлении эмиттер-коллектор. По мере изменения тока эмиттер-база ($I_б$) изменяется и ток эмиттер-коллектор ($I_к$). Ток



в направлении эмиттер-база ($I_б$) регулируется переменным малым напряжением ($U_{вход}$ – входное напряжение), подаваемым на входную часть схемы. На выходе схемы формируется переменное большое выходное напряжение ($U_{вых}$). Соответственно, транзистор используется для усиления сигналов переменного тока.

Полупроводник *p*-типа также может быть использован в качестве основы для изготовления транзистора. В этом случае эмиттерная и коллекторная области выполнены из полупроводников n-типа. Такой транзистор называется транзистором структуры *n-p-n*. Принцип работы этого типа транзистора ничем не отличается от *p-n-p* транзистора. Только в них ток направлен от коллектора к эмиттеру.

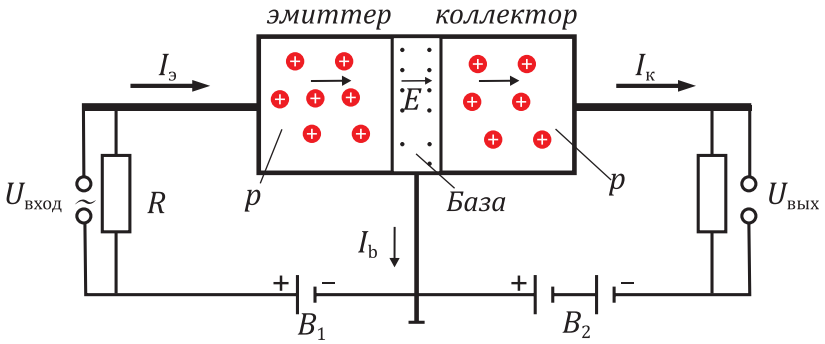
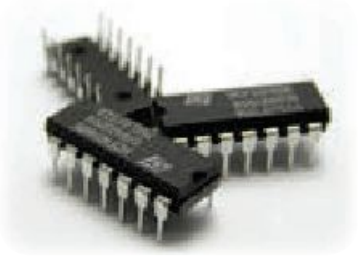


Рис. 6.33



а)



б)

Рис. 6.34

4. Интегральные микросхемы

В 70-х годах прошлого века были обнаружены микросхемы, где тысячи микроскопических транзисторов размещались на полупроводниковых пластинах диаметром 1 cm. Интегральными схемами они назывались потому, что в них вместе с транзисторами помещались диоды, конденсаторы, резисторы и другие радиоэлектронные элементы. На рис. 6.34 *а* показан внешний вид микросхем, а на рис. 6.34 *б* показаны различные микросхемы, смонтированные на плате электронного устройства. Открытие интегральных микросхем позволило размещать сложные схемы в небольших размерах и создавать настольные компьютеры. Первоначально радиоэлементы изготавливались на поверхности полупроводниковой пластины, а позже их стали делать по всему объёму пластины. Их стали называть ***микрочипами***. На базе микрочипов разрабатываются мобильные телефоны, портативные компьютеры (ноутбуки) и др. крошечные радиоэлектронные устройства. Сегодня сотни миллионов транзисторов и радиоэлементов помещаются в микрочип размером с монету. Это означает, что размер радиоэлемента ~ 10^{-9} m. 10^{-9} m равен одному нанометру. Соответственно, область, занимающаяся проектированием и производством таких микросхем, микрочипов, называется нанотехнологией.

Микросхемы, микрочипы составляют основу современных компьютеров и электронных устройств управления.



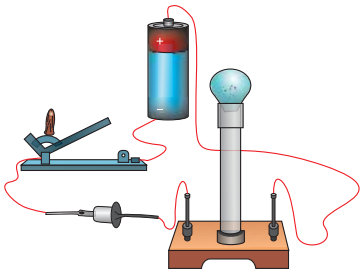
1. Какова функция полупроводникового диода?
2. Какова функция полупроводникового транзистора?
3. Как устроен транзистор?
4. В каких бытовых приборах вы видели интегральные микросхемы?



Практическое задание

Цель: наблюдение односторонней проводимости полупроводникового диода.

Необходимое оборудование: полупроводниковый диод, источник питания, лампочка, выключатель, соединительные провода.



Порядок выполнения работы

1. С помощью приспособлений составьте цепочку, как показано на рисунке.
2. В исходном состоянии ключ выключен.
3. Включите ключ и наблюдайте за лампочкой.
4. Выключите ключ и поменяйте полярность источника питания, подключённого к цепи.
5. Включите ключ и посмотрите, как загорится лампочка.

Сделайте вывод по результатам эксперимента.

?

1. Какие частицы несут заряд при p-n переходе?

2. Как зависит сопротивление p-n перехода от приложенного напряжения?

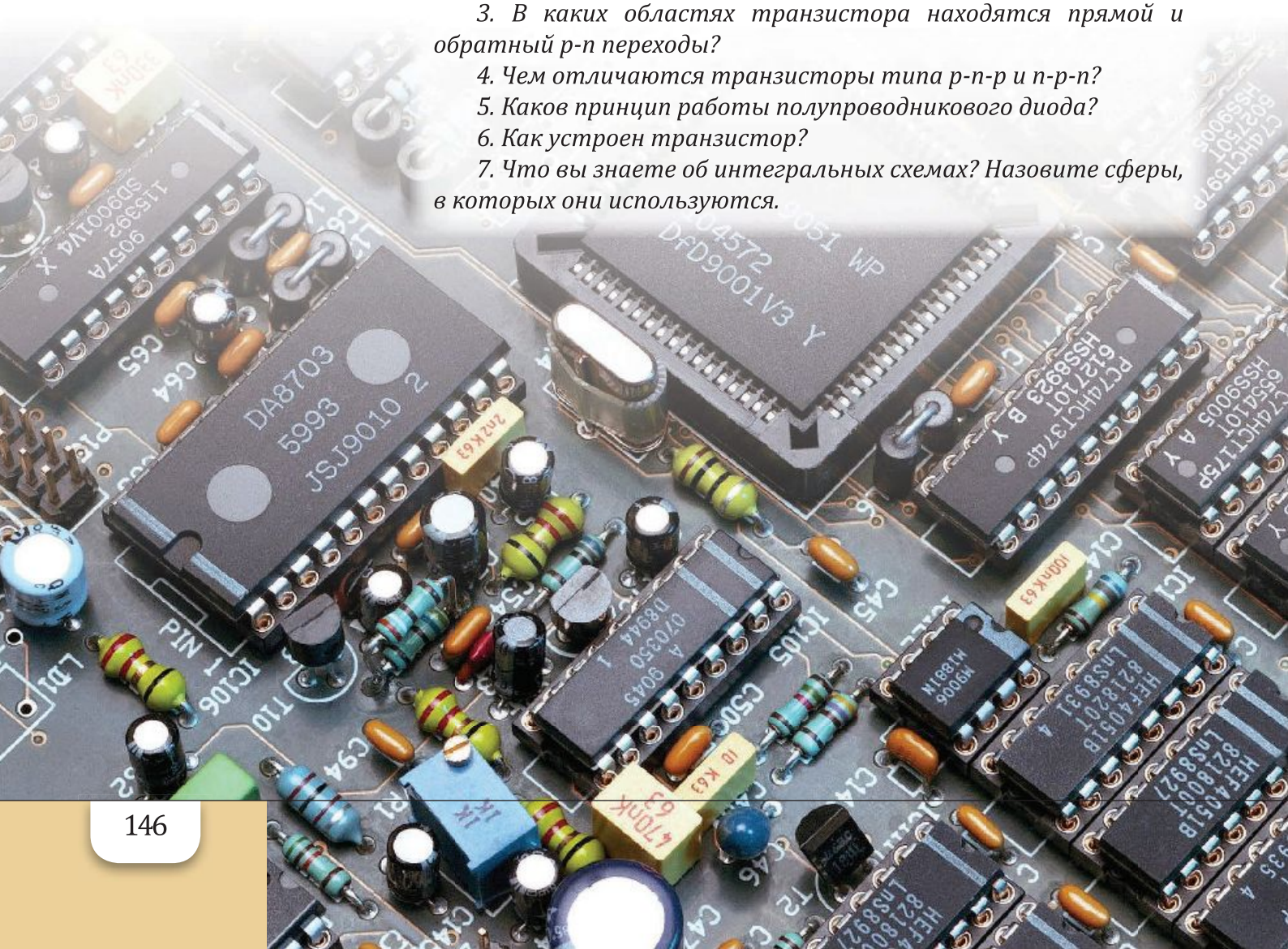
3. В каких областях транзистора находятся прямой и обратный p-n переходы?

4. Чем отличаются транзисторы типа p-n-p и n-p-n?

5. Каков принцип работы полупроводникового диода?

6. Как устроен транзистор?

7. Что вы знаете об интегральных схемах? Назовите сферы, в которых они используются.





ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

ТЕМА 46

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ДИОДА

Цель работы: изучить зависимость силы тока, проходящего через полупроводниковый диод, от приложенного к нему напряжения.

Необходимые инструменты: 1) полупроводниковый диод (на колодке); 2) источник постоянного тока (36–42 V); 3) ключ; 4) соединительные провода; 5) миллиамперметр; 6) реостат; 7) вольтметр.

Порядок выполнения работы:

1. Соберите необходимые инструменты и электрическую цепь согласно схеме на рис. 2. На чертеже имеются следующие обозначения: *M* – источник постоянного тока; *P* – реостат; *B* – вольтметр; mA – миллиамперметр; *Д* – диод; *K* – ключ.

2. Ключ приводится в разомкнутое (отключённое) состояние.

3. Сдвиньте ползунок реостата таким образом, чтобы на вольтметре установилось напряжение 0 V.

4. Включаем ключ.

5. Перемещением ползунка реостата увеличивайте напряжение, подаваемое во внешнюю цепь. Записывайте показания вольтметра и миллиамперметра.

6. Результаты измерений введите в таблицу ниже.

U, V									
I, mA									

7. Ключ устанавливается в открытое (разомкнутое) положение.

8. Полюса источника тока меняются местами и соединяются, и эксперимент повторяется в соответствии с инструкциями 3-6 выше.

9. По результатам строится график зависимости тока, проходящего через полупроводниковый диод, от приложенного напряжения.

10. Зависимость тока, протекающего через полупроводниковый диод в направлении прямого *p-n* перехода и обратного *p-n* перехода, от приложенного напряжения представлена на графике рис. 3.

При подаче обратного напряжения на диод нельзя подавать напряжение большее, чем указано в паспорте диода.

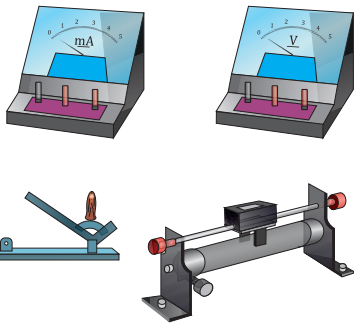




Рис. 1

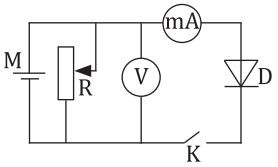


Рис. 2

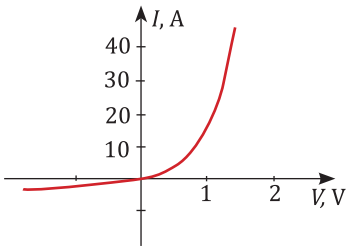


Рис. 3

1. Обратите внимание, что зависимость тока от приложенного напряжения не является прямой линией при правильном подключении диода, и попытайтесь объяснить, почему.

2. По какой причине, если даже напряжение приложено в обратном направлении, через диод протекает хотя бы небольшой ток?

3. По полученным данным найдите электрическое сопротивление диода для прямого и обратного направлений перехода.





ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ ПО ГЛАВЕ VI

1. При электролизе раствора сульфата цинка в течение 1 часа из него выделилось 2,45 g цинка. Если падение напряжения на резисторе, включённом последовательно с электролитической ванной, равно 6 V, найдите величину этого резистора. Электрохимический эквивалент цинка составляет $0{,}338 \cdot 10^{-6}$ kg/C.

2. Если в процессе электролиза раствора соли $CuSO_4$ в воде к аноду перешло 10^{20} электронов, определите массу выделившейся меди.

3. На извлечение цинка из раствора $ZnSO_4$ затрачено 2 kW·h энергии. Если разность потенциалов между электродами равна 2 V, какая масса цинка выделится на электроде?

4. В двух отдельных ваннах проводится электролитическое покрытие меди и серебра при одинаковом токе. Если за тот же промежуток времени масса слоя серебра составит 40,78 g, то какова будет масса слоя меди?

5. Какой должен быть ток, протекающий через электролит, чтобы за два часа выделилось 8,049 g серебра? Электрохимический эквивалент серебра $1{,}118 \cdot 10^{-6}$ kg/C.

6. Если разность потенциалов между Землёй и облаком 10^8 V, а энергия разряда $2 \cdot 10^9$ J, найдите количество прошедшего при разряде заряда.

7. Потенциал ионизации атома гелия равен 24,5 V. Сколько джоулей энергии должен иметь электрон, чтобы ионизировать атом гелия? Электрон, прошедший разность потенциалов в 1 V, имеет энергию 1 эВ = $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ J.

8. Какой минимальной скоростью должен обладать электрон для ионизации атома азота? Энергия ионизации атома азота равна $23{,}2 \cdot 10^{-19}$ J. Масса электрона $9{,}1 \cdot 10^{-31}$ kg.

9. Энергия ионизации атома криптона равна $22{,}2 \cdot 10^{-19}$ J. Какую разность потенциалов должен пройти электрон, ускоряющийся в электрическом поле, чтобы ионизовать атом криптона?

10. Два терморезистора с одинаковыми сопротивлениями подключены параллельно к источнику постоянного тока. Если ток в неразветвлённой части цепи уменьшился в 1,5 раза при охлаждении одного из термисторов, то во сколько раз изменилось его (термистора) сопротивление?

Глава VII



МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

В этой главе вы получите информацию по следующим темам:

- индукция магнитного поля. Магнитное поле токопроводов;
- влияние магнитного поля на проводник с током;
- взаимодействие токопроводов;
- работа, совершаемая при перемещении проводника с током в магнитном поле;
- движение заряженной частицы в магнитном поле;
- электродвигатель не переменного тока;
- электромагнитная индукция;
- энергия магнитного поля тока. Магнитные свойства веществ.

ТЕМА 47

ИНДУКЦИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ПРОВОДНИКОВ ТОКА

1. Индукция магнитного поля.
2. Индукция магнитного поля проводника постоянного тока.
3. Индукция магнитного поля в центре круглого проводника с током.
4. Индукция магнитного поля катушки с током.
5. Индукция магнитного поля токоведущего тороида.



Какие предметы, изображённые на рисунке, притягиваются к магниту?

1. Индукция магнитного поля

Известно, что между постоянными магнитами и проводниками тока существуют силы взаимодействия. На магнит, помещённый в магнитное поле, или проводник с током действует магнитное поле с некоторой силой. Магнитные стрелки, помещённые в магнитное поле, располагаются в определённом направлении (рис. 7.1).

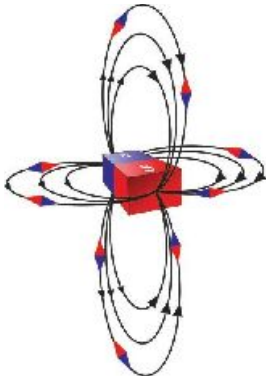


Рис. 7.1

Магнитное поле характеризуется такими физическими величинами, как индукция магнитного поля и магнитный поток. Мы познакомимся с магнитным потоком в следующих темах.

Магнитная индукция является векторной величиной и представляет собой силовую характеристику магнитного поля.

Магнитная индукция определяется как величина, численно равная максимальной силе, действующей со стороны поля на прямой проводник длиной 1 m с током 1 A, введенный в магнитное поле.

Вектор индукции магнитного поля обозначается буквой $\vec{B}$. Направление вектора индукции можно определить по положению свободно движущейся магнитной стрелки, вставленной в магнитное поле

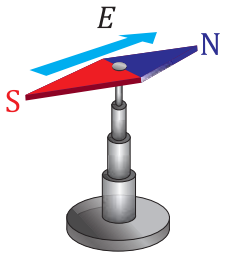
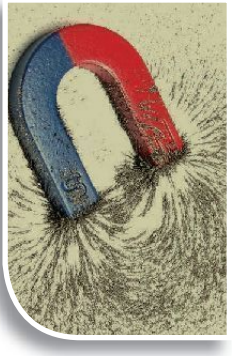


Рис. 7.2

В качестве направления вектора магнитной индукции принимается направление наведения северного полюса свободно движущейся магнитной стрелки, введённой в магнитное поле (рис. 7.2).

Линии индукции постоянного магнитного поля направлены от северного полюса (N) магнита к южному полюсу. (S) (рис. 7.3 *а*).

В произвольной точке магнитного поля вектор индукции направлен в направлении силовых линий поля (рис. 7.3 *б*).



За единицу индукции магнитного поля Тесла (Тл) был принят в XBS в честь сербского физика Николы Теслы.

Если вектор индукции имеет одинаковую постоянную величину во всех точках магнитного поля, такое магнитное поле называется однородным магнитным полем.

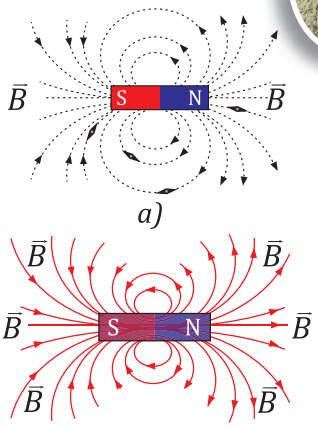


Рис. 7.3

Индукция магнитного поля прямого проводника с током

Направление силовых линий магнитного поля прямого проводника с током определяется по правилу сверления правого шурупа.

Направление вектора магнитной индукции ($\vec{B}$), создавшего не переменный ток, представляет собой окружность и направлено вдоль силовых линий (рис. 7.4). Численное значение магнитной индукции в точке d от бесконечно длинного прямого проводника с током прямо пропорционально силе тока в проводнике и обратно пропорционально расстоянию, и определяется с помощью следующего выражения:

Если поступательное движение наконечника сверла совпадает с направлением тока, то направление вращения хвостовика сверла указывает направление линий магнитной индукции (рис. 7.4).

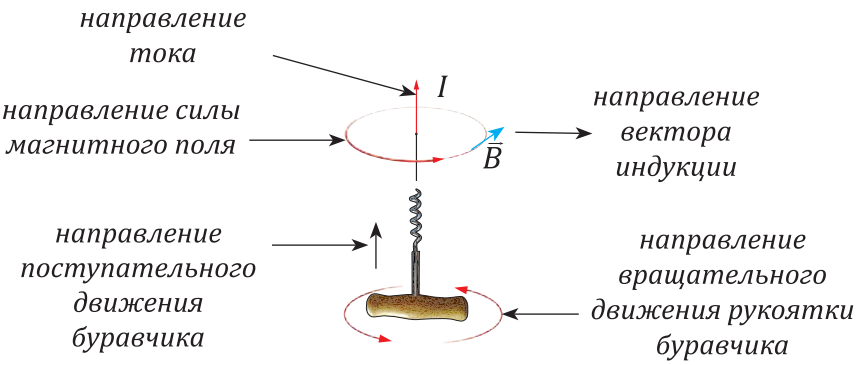


Рис. 7.4

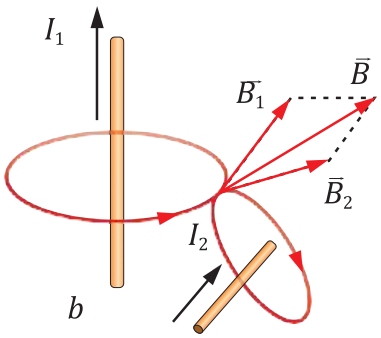


Рис. 7.5

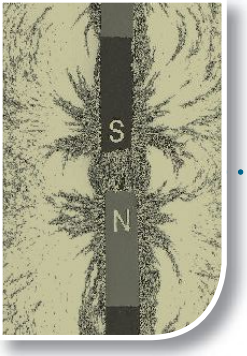
$$B = \frac{\mu_0}{2\pi}\frac{I}{d} \qquad (1)$$

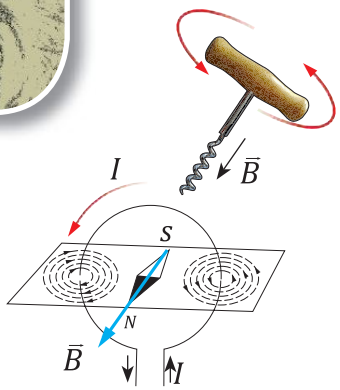
В этом случае μ_0 является скалярной величиной, называемой магнитной постоянной вакуума, её численное значение равно $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ N/A^2.

В большинстве случаев магнитное поле создаётся не одним проводником, а системой из двух и более токоведущих проводников (рис. 7.5). В таких случаях результирующая индукция поля в точке пространства равна векторной сумме индукций магнитного поля каждого проводника с током в этой точке, то есть:

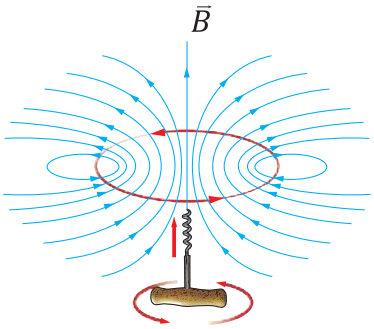
$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \vec{B}_3 + \ldots + \vec{B}_n \qquad (2)$$

Этот вывод называется принципом суперпозиции для магнитного поля. Таким образом, принцип суперпозиции магнитного поля аналогичен принципу суперпозиции электрического поля.



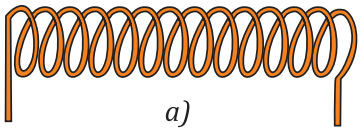


а)

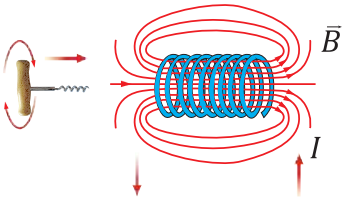


б)

Рис. 7.6



а)



б)

Рис. 7.7

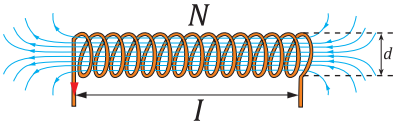


Рис. 7.8

Индукция магнитного поля в центре круглого проводника с током

В круглом проводнике с током силовые линии магнитного поля состоят из замкнутых линий, окружающих проводник. Направление силовых линий, проходящих через центр окружности, определяется по правилу Пармы. Если направление вращения ручки сверла совпадает с направлением тока в проводнике, то направление поступательного движения наконечника сверла указывает направление вектора индукции (рис. 7.6 *а, б*).

Численное значение индукции магнитного поля в центре круглого проводника с током определяется по следующему выражению:

$$B = \mu_0 \frac{I}{2R}. \qquad (3)$$

Здесь: R – радиус окружности, I – сила тока.

4. Индукция магнитного поля катушки с током

Намотаем проводник по спирали и сформируем катушку (рис. 7.7 *а*). Когда через катушку проходит ток, каждая ее обмотка создает магнитное поле. Из-за множества витков катушки результирующее магнитное поле внутри катушки в несколько раз сильнее, чем магнитное поле, создаваемое изолированным одиночным проводником.

Силовые линии магнитного поля катушки с током состоят из параллельных прямых во внутренней части катушки. Направление силовых линий можно определить по правилу правого винта.

Если направление вращения ручки сверла совпадает с направлением тока в катушке, то направление поступательного движения наконечника сверла указывает направление силовой линии, то есть вектор индукции (рис. 7.7 *б*).

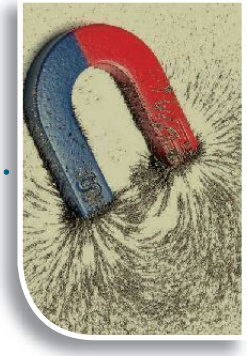
Длина катушки l, число витков N, диаметр d во много раз меньше ее длины $d << l$ (рис. 7.8). В этом случае магнитное поле, создаваемое в катушке с током, можно рассматривать как однородное магнитное поле. Численное значение индукции магнитного поля в центре катушки определяется с помощью следующего выражения:

$$B = \mu_0 \frac{IN}{l} \qquad (4)$$

5. Индукция магнитного поля токоведущего тороида

Тороидом называется система, состоящая из спирального проводника, намотанного на кольцевые основы (рис. 7.9).

При подаче тока на тороид внутри и снаружи создается магнитное поле. Внутри тороида магнитные силовые линии состоят из взаимно параллельных окружностей с центром в одной точке. Численное значение индукции магнитного поля внутри тороида определяется с помощью следующего выражения:



$$B = \frac{\mu_0 NI}{2\pi R} \qquad (5)$$

Здесь: N – количество витков, I – сила тока, R – радиус тороида.

Пример решения задач

Если ток, проходящий через тор радиусом 15 cm и числом витков 2000, равен 3 A, найдите численное значение магнитной индукции в точках, лежащих на оси тороида.

Дано:	Формула:	Решение:
N=2000 R = 0,15 m I = 3 A $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ T·m/A	$B = \frac{\mu_0 NI}{2\pi R}$	$B = \frac{2000 \cdot 3\,\text{A} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}\,\text{T} \cdot \text{m} / \text{A}}{2\pi \cdot 0{,}15\,\text{m}} = 8 \cdot 10^{-3}\,\text{T}$ **Ответ:** $B = 8 \cdot 10^{-3}$ T.
B = ?		

Упражнение 34

1. Если по бесконечно длинному проводнику в воздухе течёт ток силой 14 A, вычислите численное значение индукции магнитного поля в точке, удалённой на 10 cm от проводника.

2. Если индукция магнитного поля, создаваемого в центре круглого проводника с током радиусом 6,28 cm, равна $1{,}4 \cdot 10^{-4}$ T, найдите силу тока, проходящего через проводник.

3. В пространстве складываются магнитное поле с численным значением вектора индукции 3 mT и направлением с юга на север и магнитное поле с вектором индукции 4 mT и направлением с запада на восток. Определите величину и направление результирующего вектора индукции магнитного поля.

4. По круглому проводнику радиусом 5 cm течёт ток силой 2 A. Найдите численное значение вектора индукции магнитного поля, создаваемого в точке в центре этой обмотки.

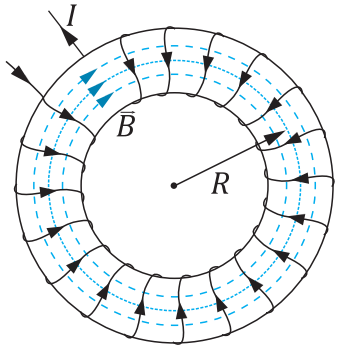


Рис. 7.9

1. Что вы подразумеваете под индукцией магнитного поля и как она измеряется?

2. Какова форма силовых линий магнитного поля прямого и подковообразного магнитов?

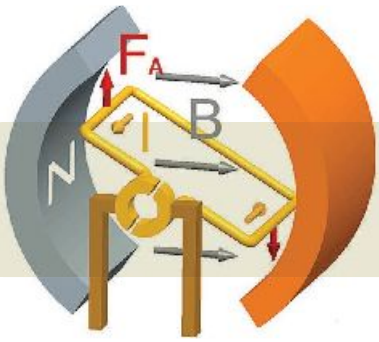
3. Нарисуйте силовые линии магнитного поля, образованные параллельными прямыми бесконечно длинными проводниками с одинаковым и противоположным направлением тока.

4. Вам даны два куска железа, один из которых является постоянным магнитом, а другой – просто железо, но точно такого же размера. Как, используя только данные предметы, определить, который из них магнит, а какой – просто железо?

ТЕМА 48

ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ПРОВОДНИК С ТОКОМ

1. Сила ампера.
2. Правило левой руки.
3. Крутящий момент, вращающий текущую рамку в однородном магнитном поле.
4. Электроизмерительные приборы.



Какая сила перемещает текущую систему отсчёта в магнитном поле?

1. Сила ампера

В 1820 году Ампер экспериментально определил действие магнитного поля на проводник с током.

Для наблюдения за экспериментом в центр подковообразного магнита помещают свободно висящий на треноге прямой проводник. С помощью соединительных проводов проводник ab подключается к источнику тока через выключатель, и образуется замкнутая цепь. При этом длина части проводника, находящейся в магнитном поле, должна быть равна Δl. Когда цепь представляет собой кольцо, проволока, на которой висит проводник *ab*, находится в вертикальном положении (рис. 7.10). Когда выключатель в цепи включен, проводник движется и избегает магнита (рис. 7.11). Когда по проводнику течёт ток, на него действует сила *F* со стороны магнита. Подвешенный провод отклоняется от вертикали на угол α. Если полюса магнита поменять местами, сила, действующая на проводник, изменит своё направление, в результате чего проводник притянется к подковообразному магниту. Если направление тока в проводнике изменить без изменения положения магнита, то направление силы, действующей на проводник, также изменится в противоположную сторону.

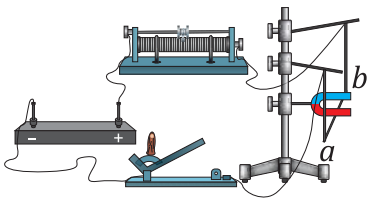


Рис. 7.10

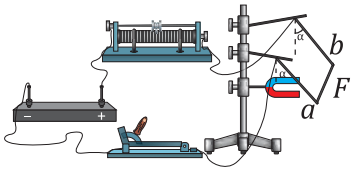


Рис. 7.11

Сила (*F*), действующая со стороны магнитного поля на часть проводника с током, находящегося в этом поле, связана с силой тока (*I*), длиной проводника (Δl), магнитной индукцией (*B*), и вектор индукции с направлением тока или между углами прямо пропорционален значению синуса α (рис. 7.12).

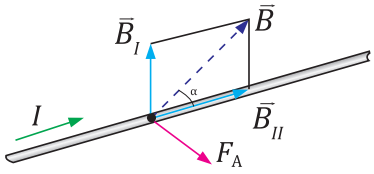
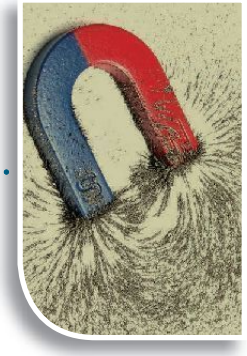


Рис. 7.12

$$F = I \cdot B \cdot \Delta l \sin\alpha \qquad (1)$$

Сила, определяемая этим выражением, называется силой Ампера.

Выражение (1) справедливо для однородного магнитного поля, т. е. справедливо для случая, когда численное значение и направление вектора индукции одинаковы во всех точках проводника. Если вектор индукции перпендикулярен ($\alpha = 90°$) направлению тока, сила Ампера, действующая на проводник

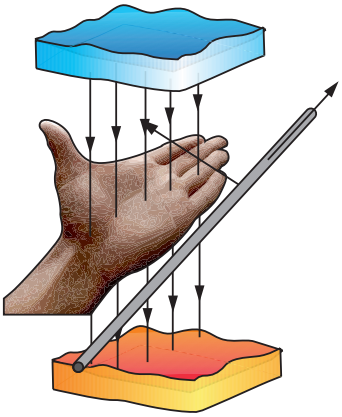


с током, достигает своего максимального значения, то есть $F_{max}=I\Delta lB$. В этом случае имеем следующее выражение для магнитной индукции:

$$B = \frac{F_{max}}{I \cdot l} \qquad (2)$$

Согласно этому выражению, можно описать физический смысл магнитной индукции: магнитная индукция в прямом проводнике длиной 1 m с током 1 A, расположенном перпендикулярно силовым линиям однородного магнитного поля, равна величине, численно равной силе магнитного поля.

$$[B] = \frac{1\,\text{N}}{1\,\text{A}\cdot 1\,\text{m}} = 1\,\text{T} \quad \text{(Тесла)}.$$



2. Правило левой руки

Направление силы, действующей на проводник с током со стороны магнитного поля, можно определить с помощью правила левой руки (рис. 7.13).

Поместим левую руку в магнитное поле так, чтобы силовые линии магнитного поля попадали на ладонь. Когда направление четырёх пальцев совпадает с направлением тока в проводнике, большой палец, повернутый на 90°, указывает направление силы ампера, действующей на проводник.

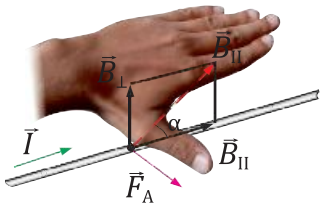


Рис. 7.12

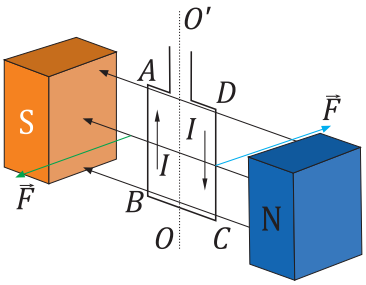
3. Крутящий момент, вращающий текущую рамку в однородном магнитном поле

Если в магнитное поле ввести систему с током, то можно наблюдать, как она отклоняется на угол (рис. 7.14). Почему текущая система скручивается в магнитном поле?

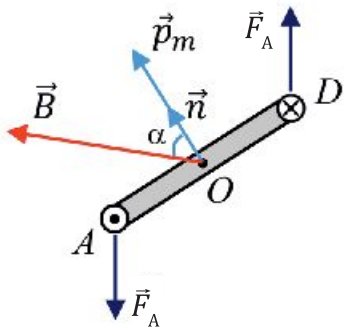
Пусть поверхность прямоугольной рамки параллельна силовым линиям магнитного поля. Если ток, протекающий со сторон AB и DC длины линии l ($l = AB = DC$), равен I (рис. 7.14, *а*), то величина силы Ампера, действующей на эти части со стороны однородного магнитного поля, равна:

$$F_A = I \cdot B \cdot l. \qquad (3)$$

Направление этой силы определяется по правилу левой руки. Модули сил, действующих на детали AB и DC, равны и направлены в противоположные стороны. Следовательно, магнитное поле действует на текущую рамку с удвоенной силой. Под действием парных сил рама обмотки поворачивается. Эти пары сил создают крутящие моменты относительно оси вращения OO' рамы. На рис. 7.14 *а* показано, что, когда плоскость рамки параллельна вектору магнитной индукции, плечо сил, действующих на части AB и DC рамки, равно $d/2$ ($d=AD=BC$).

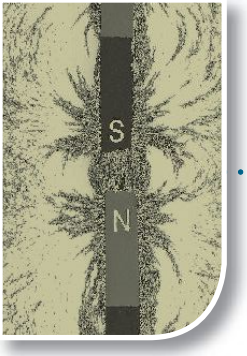


а)



б)

Рис. 7.14



Если рамку повернуть под углом, плечо сил изменится. Для определения изменения силового плеча перенесём вектор нормали ($\vec{n}$) перпендикулярно плоскости рамки (рис. 7.14 *б*, проекция шпангоута, вид сверху). Пусть угол между вектором $\vec{n}$ и вектором индукции $\vec{B}$ равен α. В этом случае плечо пары сил равно $d/2 \cdot sin\alpha$. Моменты сил поворота рамы определяются следующим выражением:

$$M_1 = M_2 = F_A \cdot \frac{d}{2} \cdot \sin\alpha \qquad (4)$$

Полный момент поворота рамы равен сумме моментов M_1 и M_2:

$$M = M_1 + M_2 = F_A \cdot d \cdot \sin\alpha = IBl \cdot d \cdot \sin\alpha \qquad (5)$$

Учитывая, что поверхность репера $S = l \cdot d$,

$$M = I \cdot S \cdot B \cdot sin\alpha \qquad (6)$$

Если $\alpha = \pi/2$ индукция магнитного поля равна:

$$B = \frac{M_{max}}{IS} \qquad (7)$$

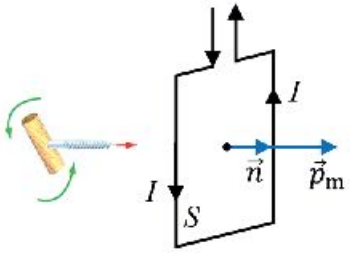
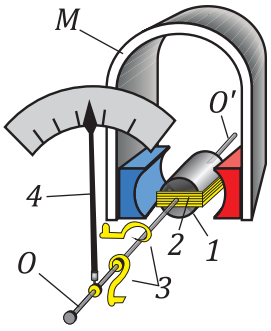


Рис. 7.15

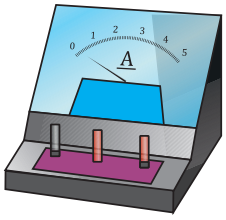
Произведение тока в рамке на поверхность, образованную рамкой ($\vec{p}_m$), называется магнитным моментом рамы тока:

$$p_m = I \cdot S. \quad (8)$$

Магнитный момент рамки обмотки является векторной величиной, и его направление можно найти по правилу правого винта. Если направление вращения ручки сверла совпадает с направлением тока в рамке, то направление поступательного движения наконечника сверла указывает на направление магнитного момента текущей рамки (рис. 7.15). Направление вектора нормали ($\vec{n}$), перенесенного на плоскость рамки, совпадает с направлением вектора магнитного момента $\vec{p}_m$ рамки (рис. 7.15). Магнитный момент текущей системы отсчета измеряется в XBS $[p_m]$ = A·m^2.



а)

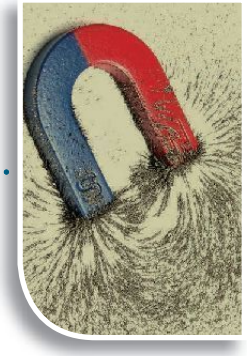


б)

Рис. 7.16

4. Электроизмерительные приборы

Работа многих электрических устройств основана на взаимодействии проводника с током и постоянным магнитом. Структура одного такого электроизмерительного прибора показана на рис. 7.16 *а*. Железную основу (1) закрепляют между полюсами мощного магнита (*M*), а на сам магнит натягивают проволочную рамку (2). Она крепится на ось *OO′*. К оси *OO′* прикрепляются металлические пружины (3) и стрелка (4). Это позволяет проволочной рамке одновременно вращать стрелку и пружины вокруг оси *OO′*. Электрический ток подаётся на линии через пружины. Эти пружины удерживают стрелку на нуле шкалы, когда рамка обесточена. Когда инструмент подключён к



электрической цепи, ток протекает через проволочную рамку и отклоняется магнитным полем. Прогиб рамки и прогиб стрелки продолжаются до тех пор, пока сила упругости пружины и силы Ампера не сравняются. При последовательном включении инструмента в электрическую цепь силы тока, проходящие через цепь и катушку инструмента, равны между собой, поэтому угол поворота стрелки пропорционален силе тока. В этом случае прибор используется как амперметр (рис. 7.16 *б*).

В настоящее время широкое распространение получили электроизмерительные приборы, работающие с цифровыми сигналами. Они работают по принципу преобразования аналоговых сигналов в цифровые с помощью микросхем на основе полупроводниковых *p-n* переходов. Такие приборы многофункциональны, и один прибор способен измерять переменную и постоянную силу тока, напряжение, мощность тока, отпускаемого потребителем, электрическое сопротивление, электрическую ёмкость, частоту и т.д. Их еще называют мультиметрами. На рис. 7.17 показан внешний вид одного из таких устройств.



Рис. 7.17

1. Почему прямой проводник с током, помещённый в однородное магнитное поле, движется вперёд, а рамка с током вращается?

2. Как определяется сила, действующая на рамку с током, помещённую в однородное магнитное поле?

3. Почему вращающий момент влияет на текущую систему отсчёта, вставленную в магнитное поле?

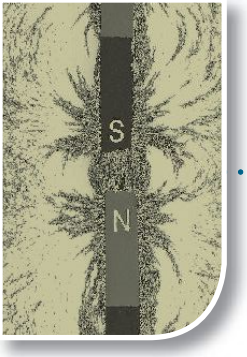
4. Объясните момент пары сил, действующих на жёсткую раму, на примере автомобильного руля.

5. Приведите примеры устройств, работающих на основе воздействия магнитного поля на текущий кадр.

Пример решения задач

Проволочная рамка с площадью поверхности 20 cm^2 и 100 витками помещена в магнитное поле. При прохождении тока силой 2 А через рамку создаётся максимальный крутящий момент 0,5 mN·m. Определите индукцию магнитного поля.

Дано:	**Формула:**	**Решение:**
$S=20\ cm^2 = 20\cdot10^{-4}\ m^2$ $N = 100$ $I = 2\ A$ $M_{max} = 0,5\cdot10^{-3}\ N\cdot m$	$M_{max} = N\cdot I\cdot B\cdot S$ $B = \frac{M_{max}}{N\cdot I\cdot S}$	$B = \frac{0,5\cdot10^{-3}\ N\cdot m}{100\cdot 2\ A\cdot 2\cdot10^{-3}\ m^2} = 1,25\cdot10^{-3}\ T = 1,25\ mT$ **Ответ:** $B = 1,25\cdot10^{-3}$ T.
$B = ?$		



Упражнение 35

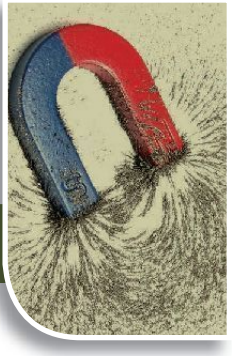
1. Однородное магнитное поле действует с силой 3 N на прямой проводник длиной 25 cm, расположенный под углом 30° к силовым линиям. Если сила тока в проводнике 30 A, найдите численное значение индукции магнитного поля. Нарисуйте схему задачи и укажите направления векторных величин.

2. Максимальный крутящий момент, действующий на рамку с площадью поверхности 1 cm^2, находящуюся в однородном магнитном поле, равен 2 μN·m. Ток, проходящий через рамку, равен 0,5 A. Найдите численное значение индукции магнитного поля.

3. На проводник постоянного тока длиной 0,4 m, помещённый в однородное магнитное поле, действует сила Ампера $9 \cdot 10^{-2}$ N. Если сила тока в проводнике 10 A, а индукция поля $7{,}6 \cdot 10^{-2}$ T, определите угол между направлением тока и направлением вектора индукции магнитного поля.

4. Если к проводнику с током длиной 0,5 m перпендикулярно силовым линиям однородного магнитного поля с индукцией $2 \cdot 10^{-2}$ T приложена сила 0,15 N, найдите протекающий по нему ток.





ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПРОВОДНИКОВ С ТОКОМ

ТЕМА 49

1. Взаимодействие прямых параллельных проводников с током.
2. Сила взаимодействия параллельных токов.



Существуют ли силы взаимодействия между проводящими проводами в линиях электропередач?

Что это за силы, если они есть, и какова природа этого взаимодействия?

1. Влияние прямых параллельных проводников с током

Как и электрические заряды, существуют силы взаимодействия между проводниками с током. Но электростатические силы и магнитные силы различны по своей природе. Чтобы наблюдать это на практике, возьмём два эластичных проводника и закрепим их на опоре в вертикальном положении.

Если соединить верхнюю часть проводников проводом, то ток по проводникам потечёт в обратном направлении (рис. 7.18 *а*). В результате проводники отталкиваются и расстояние между ними увеличивается. Если сделать так, чтобы ток протекал по проводникам в одном направлении, то проводники будут притягиваться друг к другу (рис. 7.18 *б*).

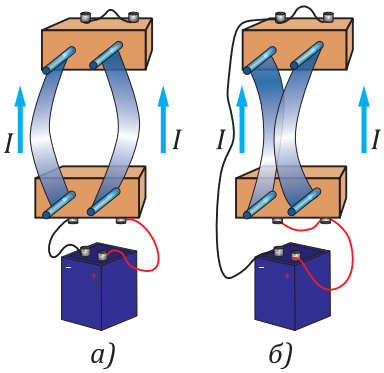


Рис. 7.18

2. Сила взаимодействия параллельных токов

Используя закон Ампера, определим направление и величину силы взаимодействия между бесконечно длинными параллельными проводниками тока в вакууме.

Пусть токи I_1 и I_2 текут в одном направлении по двум параллельным прямым проводникам, расположенным на расстоянии d друг от друга (рис. 7.19).

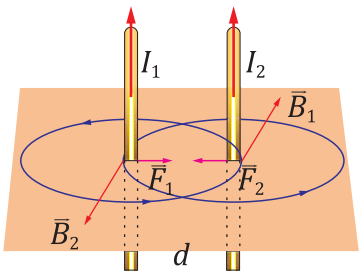


Рис. 7.19

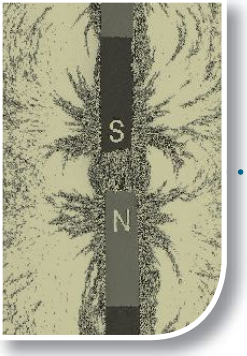
Линии вектора индукции магнитного поля токов I_1 и I_2, проходящих через проводники, состоят из концентрических окружностей.

Если ток I_1 течёт снизу вверх, то в точках, лежащих на втором проводнике, вектор $\vec{B}_1$ (по правилу буравчика) будет направлен от нас к плоскости учебника. Вектор $\vec{B}_1$ перпендикулярен проводнику. Направление силы F_2, которую оказывает магнитное поле первого тока на длину второго проводника с током Δl, направлено в сторону первого проводника, и по закону Ампера её величина равна:

$$F_2 = B_1 \cdot I_2 \cdot \Delta l \qquad (1)$$

Подставляя в эту формулу выражение магнитной индукции постоянного тока (d – расстояние между проводниками), получаем следующую формулу:

$$F_2 = \mu_o \frac{I_1 \cdot I_2}{2\pi \cdot d} \cdot \Delta l \qquad (2)$$



Значит, сила взаимодействия, действующая на единицу длины бесконечных длинных параллельных токов, пропорциональна произведению протекающих по ним сил токов и обратно пропорционально расстоянию между ними. Сила F_1, создаваемая магнитным полем второго тока и действующая на первый проводник длиной Δl, направлена ко второму проводнику, а его числовое значение представляет собой простое выражение, аналогичное выражению (2) и записывается как:

$$F_1 = \mu_o \frac{I_2 \cdot I_1}{2\pi \cdot d} \cdot \Delta l \qquad (3)$$

На основе магнитного взаимодействия параллельных постоянных токов единицей силы тока является ампер (A).

Определение 1 ампера: принято, что если расстояние между бесконечно длинными параллельными проводниками равно 1 m, а каждый метр длины проводников взаимодействует с силой $2 \cdot 10^{-7}$ H, то ток, проходящий через эти проводники, равен 1 A.

1. Как определяется направление сил взаимодействия между параллельными проводниками с током?

2. Объясните силу взаимодействия между двумя параллельными проводниками с токами I_1 и I_2, протекающими в противоположных направлениях.

3. Взаимодействуют ли провода с током на столбах?

Пример решения задачи

Найдите силу взаимодействия на метр длины двухпроводной линии электропередачи постоянного тока на расстоянии 1,6 m. Принять значение тока, проходящего по проводникам, равным 40 A.

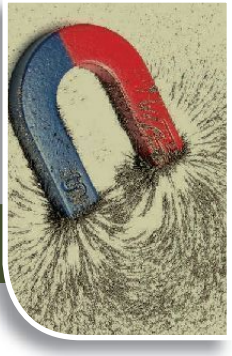
Дано:	Формула:	Решение:
d = 1,6 m $I_1 = I_2$ = 40 A $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ N/A^2 Δl = 1 m	$F = \mu_o \frac{I_1 \cdot I_2}{2\pi \cdot d} \cdot \Delta l$	$F = 4\pi 10^{-7}\ \text{N/A}^2 \cdot \frac{40\ \text{A} \cdot 40\ \text{A}}{2\pi \cdot 1,6\ \text{m}} \cdot 1\ \text{m} = 2 \cdot 10^{-4}\ \text{N}$ **Ответ:** $F = 2 \cdot 10^{-4}$ N.
F = ?		

Упражнение 36

1. Ток в параллельных проводах двухпроводной линии длиной 5 m равен 500 A. Токи противоположно направлены. Если расстояние между проводами 25 cm, с какой силой они действуют друг на друга?

2. По двухпроводной линии, расположенной в воздухе, проходит ток 5 A. Найдите силу, действующую на единицу длины каждого провода линии, если расстояние между проводами 40 cm.

3. Однородное магнитное поле с магнитной индукцией 0,1 T действует с силой на проводник с током с силой 0,5 N. Длина проводника 20 cm. Определите ток, проходящий по проводнику, расположенному перпендикулярно линиям магнитного поля.



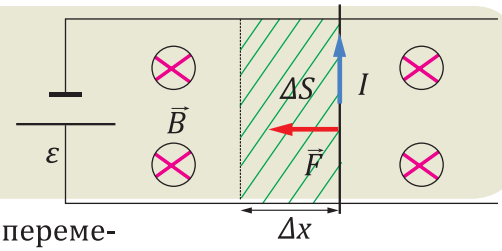
РАБОТА, СОВЕРШАЕМАЯ ПРИ ПЕРЕМЕЩЕНИИ ПРОВОДНИКА С ТОКОМ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

ТЕМА 50

1. Поток магнитного поля.

2. Работа, совершаемая при перемещении прямолинейного проводника с током в магнитном поле.

При перемещении проводника с током из одного места в другое в магнитном поле под действием силы Ампера совершается работа. За счёт какой энергии совершается эта работа?



Прежде чем определить работу, совершаемую при перемещении проводника с током в магнитном поле, познакомимся с потоком магнитного поля.

1. Поток магнитного поля

Для описания количества силовых линий магнитного поля, пересекающих поверхность, вводится величина, называемая магнитным потоком. Магнитный поток, проходящий через поверхность, определяется вектором индукции магнитного поля.

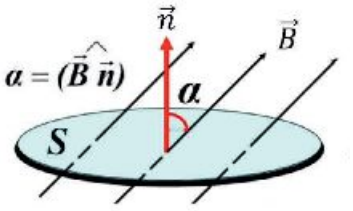
Произведение магнитной индукции, площади поверхности, через которую проходит магнитное поле, а также косинуса угла между нормалью к поверхности и вектором магнитной индукции называется магнитным потоком через поверхность площадью S. Магнитный поток обозначается буквой Φ.

Согласно определению, запишем выражение магнитного потока в следующем виде:

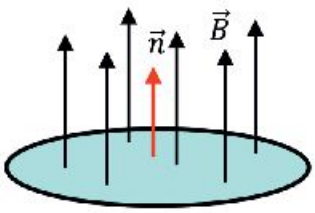
$$\Phi = B \cdot S \cdot \cos\alpha. \qquad (1)$$

Если линии индукции магнитного поля перпендикулярны поверхности ($\alpha = 0$) (рис. 7.20 б), то магнитный поток, проходящий через поверхность, будет следующим:

$$\Phi = B \cdot S. \qquad (2)$$



а)



б)

Рис. 7.20

В СИ единицей магнитного потока является Вебер (Wb), принятый в честь немецкого физика Д. Вебера. Из уравнения (2) единица магнитного потока равна

$$1\ \text{Wb} = 1\ \text{T} \cdot 1\ \text{m}^2.$$

Магнитный поток, пересекающий поверхность площадью $1\ \text{m}^2$ перпендикулярно линиям индукции магнитного поля, с индукцией магнитного поля, равной 1 T, равен 1 Wb.

2. Работа, совершаемая при перемещении прямолинейного проводника с током в магнитном поле

Рассмотрим случай, когда две параллельные гладкие металлические проволоки a и b размещены на расстоянии l друг от друга, а на них наложен проводник из лёгкого металла c (рис. 7.21).

Система проводников находится в однородном поле с магнитной индукцией $\vec{B}$. Знак (⊗) на рис. 7.21 означает, что век-

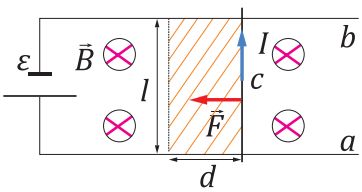
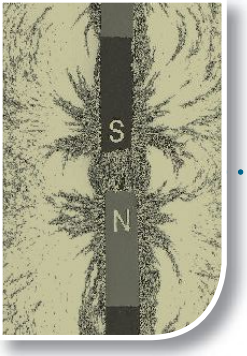


Рис. 7.21



тор индукции магнитного поля направлен перпендикулярно от нас к плоскости изображения. Когда проводники *a* и *b* подключены к источнику тока, ток начинает течь по проводнику *c*. В этом случае на проводник с током длиной *l* действует магнитное поле, которое определяется выражением $F = IBl$. Зная, что угол между направлением тока и направлением индукции магнитного поля равен 90°, направление силы определяется по правилу левой руки. Это сила, согласно рис. 7.21, направлена влево и совершает работу

$$A = Fd = IBld \qquad (3)$$

при перемещении проводника с на расстояние d. Произведение $l{\cdot}d$ в этом выражении равно численному значению площади прямоугольной поверхности, очерчиваемой проводником при его движении, т.е. $\Delta S{=}l{\cdot}d$. Поскольку магнитный поток, пересекающий поверхность фигуры, очерчиваемой проводником при его движении, равен $\Delta F = B{\cdot}\Delta S$, то имеем следующее выражение:

$$A = I{\cdot}\Delta\Phi \qquad (4)$$

Следует отметить, что эту работу выполняет не магнитное поле, а источник, подающий ток в цепь.

Итак, при перемещении проводника с током в магнитном поле работа, совершаемая силой Ампера, равна произведению тока, проходящего через проводник, на изменение магнитного потока.

Работа, совершаемая при перемещении проводника с током в магнитном поле, широко используется на практике. Это имеет большое значение в сфере транспорта, бытовой техники и электроники. Примером также могут служить широко используемые сегодня электронные замки.



1. Какая работа совершается при перемещении проводника с током в магнитном поле?

2. Какая работа совершается, если направление тока и индукция магнитного поля совпадают?

3. За счёт чего совершается работа при перемещении проводника с током в магнитном поле?

Пример решения задачи

По проводнику длиной 30 cm протекает ток силой 2 A. Проводник расположен под углом 30° к линиям индукции однородного магнитного поля с индукцией 1,5 T. Какая работа будет совершена, если проводник переместится на 4 cm в направлении тока?

Дано:	**Формула:**	**Решение:**
l = 30 cm = 0,3 m I = 2 A B = 1,5 T α = 30° d = 4 cm = $4{\cdot}10^{-2}$ m	$A = I{\cdot}B{\cdot}l{\cdot}d{\cdot}\sin\alpha$	A = 2 A·1,5 T·0,3 m·4·10^{-2} m·1/2 = 18·10^{-3} J. **Ответ:** A = 18 mJ.
A = ?		



Упражнение 37

1. Найдите ток магнитной индукции, проходящий через поверхность площадью 25 cm^2 под углом 60° к силовым линиям в однородном магнитном поле с магнитной индукцией 0,5 T.

2. При вращении проволочной рамки площадью 25 cm^2 в однородном магнитном поле магнитный поток, проходящий через рамку, изменяется по закону $\Phi = 5 \cdot 10^{-4} cos(2\pi t)$ (Wb). Найдите численное значение индукции магнитного поля.

3. Прямой проводник длиной 20 cm движется со скоростью 5 m/s в однородном магнитном поле с индукцией 0,1 T. Чему равна сила магнитного поля, если угол между направлением движения проводника и направлением силовых линий магнитного поля равен 90°, а сила тока в проводнике равна 50 A?

4. В однородном магнитном поле с индукцией 0,5 T прямолинейный проводник длиной 10 cm движется прямолинейно, и по нему протекает ток, равный 2 A. Проводник движется в направлении, перпендикулярном магнитному полю, со скоростью 2 m/s. Определите работу, совершаемую для перемещения проводника за 10 s, и мощность, затраченную на это перемещение.

5. По прямому проводнику длиной 0,1 m протекает ток силой 12 A. Проводник расположен под углом 30° к линиям индукции однородного магнитного поля с индукцией 0,4 T. Какая работа будет совершена, если проводник переместится на расстояние 0,02 m в направлении силы Ампера?

ТЕМА 51

ДВИЖЕНИЕ ЗАРЯЖЕННОЙ ЧАСТИЦЫ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

1. Сила Лоренца.

2. Движение заряженной частицы в однородном магнитном поле.



Как появляется северное сияние? Почему северное сияние наблюдается только на полюсе?

1. Сила Лоренца

Силу Ампера, действующую со стороны магнитного поля на проводник с током, помещённый в магнитное поле, можно рассматривать как сумму сил, действующих на каждую заряженную частицу, движущуюся в проводнике и создающую ток. Если число всех заряженных частиц, упорядоченно движущихся в проводнике с током длиной l, равно N, то сила, действующая на одну частицу, движущуюся в магнитном поле, равна

$$F = F_A/\mathrm{N} = (I \cdot B \cdot l \cdot \sin\alpha)/N. \quad (1)$$

будет. Выразим ток, протекающий через проводник, через концентрацию свободных электронов n:

$$I = e \cdot n \cdot \upsilon \cdot S \text{ va } N = n \cdot S \cdot l, \quad (2)$$

где e – модуль заряда электрона, y – упорядоченная скорость электронов, S – поверхность поперечного сечения проводника. Подставляя эти выражения в уравнение (1), выражение силы, действующей на один электрон, будет следующим:

$$F = e\upsilon B\sin\alpha. \quad (3)$$

Мы получили уравнение (3), используя выражение силы Ампера, действующей на проводник, находящийся в магнитном поле. Это выражение справедливо для произвольной заряженной частицы с зарядом q, движущейся со скоростью v в однородном магнитном поле с индукцией, равной B. Сила, действующая на заряженную частицу, движущуюся в магнитном поле, называется ***силой Лоренца*** и определяется следующим образом:

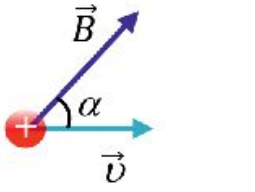


рис. 7.22

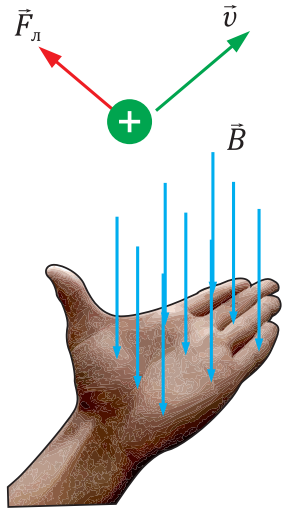


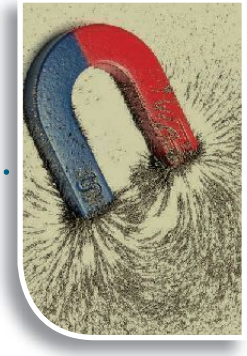
Рис. 7.23

Сила $F_л$, действующая на заряженную частицу, движущуюся в однородном магнитном поле, равна произведению заряда q частицы, скорости ее движения υ, индукции магнитного поля B и синуса угла между вектором скорости и вектором индукции магнитного поля (рис. 7.22).

$$F_л = q\upsilon B\sin\alpha \quad (4)$$

Направление силы Лоренца определяется с помощью правила левой руки (рис. 7.23).

Если вектор магнитного поля перпендикулярен ладони левой руки, а направление раскрытых указательных пальцев совпадает с направлением движения положительного заряда, то большой палец, раскрытый на 90°, показывает направление Лоренцевой силы.



Согласно правилу левой руки, сила Лоренца, действующая на протон, влетающий в магнитное поле, рис. 7.24, направлена вправо, а сила Лоренца, действующая на электрон, направлена влево. При определении движения электрона (отрицательного заряда) в поле ставим четыре пальца в направлении, противоположном направлению движения электрона. В этом случае сила Лоренца, действующая на электрон, направлена влево (рис. 7.24). Если заряженная частица движется вдоль линий магнитной индукции (при $\alpha = 0$), то магнитное поле не действует на неё.

2. Движение заряженной частицы в однородном магнитном поле

Теперь рассмотрим влияние силы Лоренца на движение заряженной частицы. Пусть частица влетает в силовые линии однородного магнитного поля в вертикальном направлении (рис. 7.25). В этом случае угол между направлением скорости частицы и линиями индукции равен 90°, а сила Лоренца, действующая на частицу, максимальна $F_Л = q\upsilon B$.

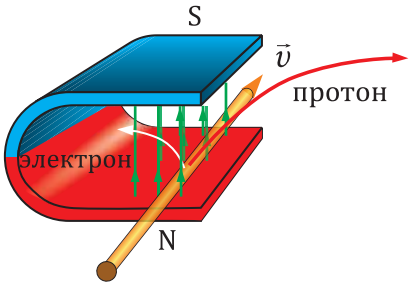


Рис. 7.24

Поскольку сила Лоренца перпендикулярна направлению движения частицы, движущейся в магнитном поле, она действует как центростремительная сила. В результате направление движения заряженной частицы непрерывно меняется, а траектория движения непрерывно искривлена и представляет собой окружность. В связи с тем, что сила Лоренца не совершает работы, численное значение центробежной силы, возникающей при круговом движении, равно силе Лоренца, т.е.:

$$\frac{m\upsilon^2}{R} = q\upsilon B \qquad (5)$$

Траектория движения заряженной частицы в однородном магнитном поле представляет собой окружность, радиус которой определяется следующим выражением:

$$R = \frac{m\upsilon}{qB} \qquad (6)$$

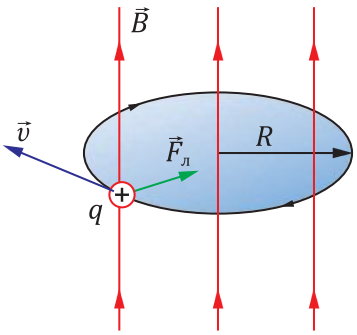


Рис. 7.25

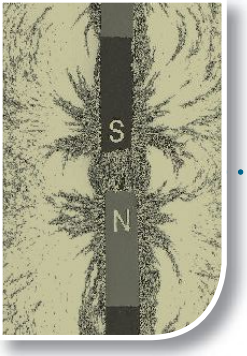
Определим время, за которое частица совершает один полный оборот, то есть период вращения. Для этого разделим путь (длина окружности $2\pi \cdot R$) частицы за один полный оборот на скорость частицы (υ):

$$T = \frac{2\pi R}{\upsilon} \qquad (7),$$

Используя выражение (6), запишем выражение (7) в следующем виде:

$$T = \frac{2\pi m}{qB} \qquad (8)$$

Явление искривления траектории заряженной частицы, движущейся в магнитном поле используется на практике. Прибор, разделяющий заряженные частицы, движущиеся в вакууме под действием магнитного и электрического поля, на составляющие по их массе, называется масс-спектрометром. Масс-спектрометры применяют для определения изотопов химических элементов и химического анализа веществ.



1. Объясните направление силы Лоренца на основе правила левой руки.

2. Объясните силу, действующую на движущуюся по окружности заряженную частицу в однородном магнитном поле.

3. При каком направлении движения заряженной частицы при входе в магнитное поле на неё не действует сила Лоренца?

4. Какие вы знаете устройства, работающие на основе силы Лоренца?

5. Если заряженная частица войдет в однородное магнитное поле под острым углом к силовым линиям, какова будет её траектория?

Пример решения задачи

Если электрон вошёл в линии индукции магнитного поля с индукцией 12 mT и продолжил двигаться по окружности радиусом 4 cm, с какой скоростью он вошёл в поле?

Дано:	Формула:	Решение:
$B = 12\ \text{mT} = 12\cdot10^{-3}\ \text{T}$ $q = 1{,}6\cdot10^{-19}\ \text{C}$ $R = 4\ \text{cm} = 4\cdot10^{-2}\ \text{m}$ $\alpha = 90°$ $m = 9{,}1\cdot10^{-31}\ \text{kg}$ $\upsilon = ?$	$F_{л} = q\upsilon B\sin\alpha$ $F_{ц.с} = \frac{m\upsilon^2}{R}$ $F_{л} = F_{ц.с};\ \upsilon = \frac{q\cdot B\cdot R}{m}$	$\upsilon = \frac{1{,}6\cdot10^{-19}\ \text{C}\cdot12\cdot10^{-3}\ \text{T}\cdot4\cdot10^{-2}\ m}{9{,}1\cdot10^{-31}\ \text{kg}} = 8{,}4\cdot10^{7}\ \text{m/s}$ **Ответ:** $\upsilon = 8{,}4\cdot10^{7}\ \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

Упражнение 38

1. Электрон, пройдя разность ускоряющих потенциалов 1000 V, влетает в однородное магнитное поле в направлении, перпендикулярном линиям индукции. Если магнитная индукция равна 10^{-3} T, то каков радиус круговой траектории электрона?

2. Чтобы протоны имели энергию 5 MeV в циклотроне с магнитной индукцией 1 T, по траектории какого радиуса они должны двигаться? Масса протона $1{,}67\cdot10^{-27}$ kg, примем 1 eV = $1{,}6\cdot10^{-19}$ J.

3. Заряженная частица движется по окружности в однородном магнитном поле со скоростью 10^{6} m/s. Индукция магнитного поля 0,3 T, радиус окружности 4 cm. Каким должен быть заряд частицы, чтобы её кинетическая энергия была равна 12 keV?

4. Электрон влетает в однородное магнитное поле в направлении, перпендикулярном линиям индукции. Скорость электрона $4\cdot10^{6}$ m/s. Индукция магнитного поля 10^{-3} T. Найдите центростремительное ускорение электрона.

5. Найдите, какая центробежная сила действует на протон, движущийся со скоростью 10 Mm/s в направлении, перпендикулярном силовым линиям однородного магнитного поля с индукцией 0,2 T.



ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА

ТЕМА 52

1. Конструкция электродвигателя.
2. Принцип работы электродвигателя.
3. Использование электродвигателей.

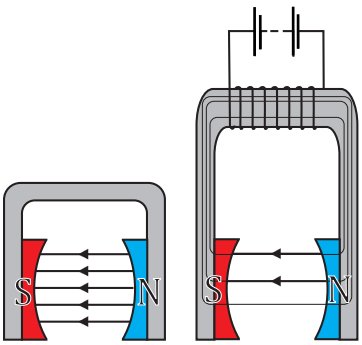


Объясните причину, приводящую вал электродвигателя во вращательное движение.

1. Устройство электродвигателя

Электродвигатель постоянного тока представляет собой устройство, состоящее из двух основных частей – статора и ротора, которое преобразует электрическую энергию постоянного тока в механическую энергию.

Статор – латинское слово, означающее «фиксированный». Статор состоит из постоянного магнита (рис. 7.26-*а*) или электромагнита (рис. 7.26-*б*), который закреплен на корпусе двигателя. «Ротор» – латинское слово, означающее «вращаться». Ротор – вращающаяся часть двигателя. Основная часть ротора состоит из рамы с одной или несколькими катушками, то есть якоря (1) (рис. 7.27) и коллектора (2). Концы проводов в якоре соединяются с токосъёмными кольцами. Коллектор вращается вместе с якорем. Две угольные щётки (3) неподвижно закреплены снаружи колец коллектора. Концы проводов в якоре соединяются с токосъёмными кольцами. Они плотно прижимаются к кольцам коллектора с помощью специальных пружин. Электрический ток в цепи проходит через эти щетки к кольцам коллектора.



а) *б)*

Рис. 7.26

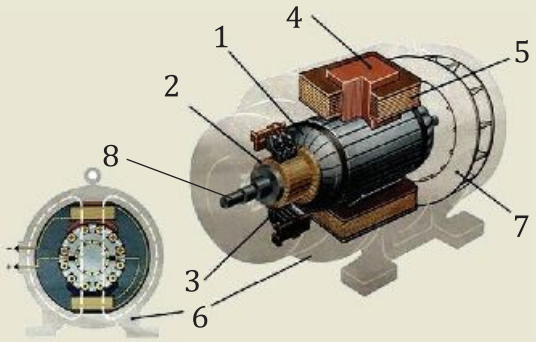
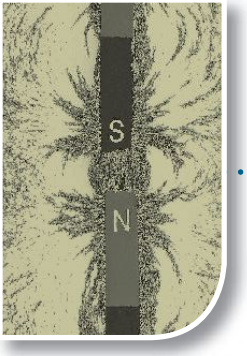


Рис. 7.27

1. Якорь (рамы с железной основой).
2. Коллектор.
3. Щётки.
4. Сердечник полюса электромагнита.
5. Спирали полюса электромагнита.
6. Статор.
7. Вентилятор.
8. Вал.

2. Принцип работы электродвигателя

Для удобства рассмотрим принцип работы простейшего двигателя, состоящего из однорамного ротора (рис. 7.28). Коллектор двигателя состоит из двух полуколец, на которых закре-



плены щётки *A* и *B*. К щёткам подключаются провода, идущие от двух полюсов источника тока. Ток, поступающий от источника тока, проходит через щётку, коллектор и рамку в направлении *A*-1-2-3-4-*Б* (рис. 7.28-*а*). Под действием магнитного поля рамка пытается расположиться перпендикулярно силовым линиям магнитного поля. Когда плоскость рамки перпендикулярна силовым линиям магнитного поля, щётки *A* и *B* не касаются токосъёмных колец и ток через рамку не проходит (рис. 7.28-*б*). Однако рамка продолжает вращаться по собственной инерции и остается параллельной силовым линиям магнитного поля (рис. 7.28-*в*). При этом щётки касаются колец коллектора и ток через корпус течёт в направлении *A*-4-3-2-1-*B*. Под действием магнитного поля рамка пытается вернуться в перпендикулярное положение. Таким образом, процесс продолжается, и рамка непрерывно вращается.

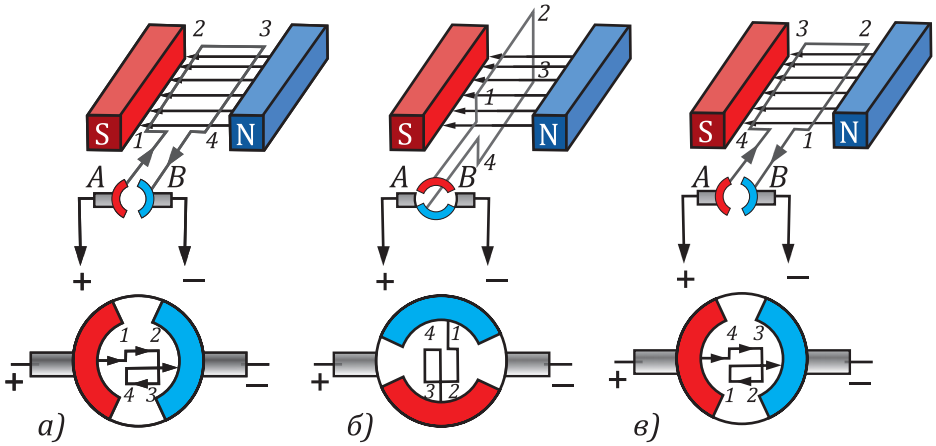


Рис. 7.28

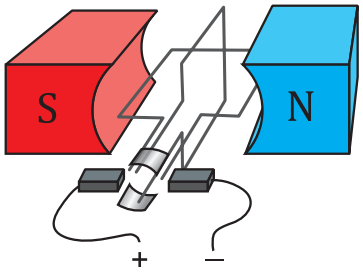


Рис. 7.29

На практике двигатели, состоящие из ротора с одной рамкой, не применяются. Потому что вращение рамки в них неравномерно, и мощности рамки недостаточно для поворота оси ротора (вала). На рис. 7.29 показана конструкция электродвигателя с двумя рамками. В этом случае рамки крепятся к одной оси перпендикулярно друг другу. У коллектора будет четыре обмотки, а не две. В роторе с двумя рамками при прохождении тока через первую рамку, расположенную параллельно силовым линиям магнитного поля, он под действием магнитного поля старается оказаться в перпендикулярном положении и обеспечивает плавное перемещение рамки.



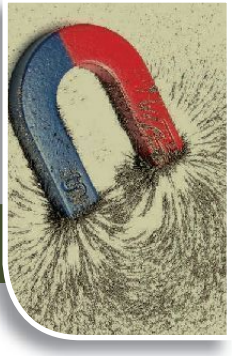
1. Объясните, как происходит преобразование энергии одного вида в другой в электродвигателе постоянного тока.

2. Объясните устройство электродвигателя.

3. Опишите принцип работы электродвигателя.

4. Каковы преимущества электродвигателя?

5. Что вы знаете об использовании электродвигателя?



Примеры решения задач

1. Два параллельных бесконечно длинных прямых проводника находятся на расстоянии 40 cm друг от друга в вакууме. Если по одному из них течет ток 12 А, а по другому 18 А, найдите силу F/l, действующую на единицу длины каждого провода.

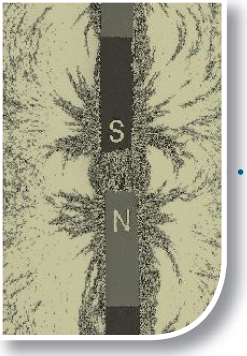
Дано:	Формула:	Решение:
$I_1 = 12$ A $I_2 = 18$ A $d_0 = 0{,}4$ m $\mu_0 = 4\cdot\pi\cdot10^{-7}$ N/A^2 $F/l = ?$	$F = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi d_0} l$ $\frac{F}{l} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi d_0}$	$\frac{F}{l} = \frac{4\pi\cdot10^{-7}\,\text{N/A}^2\cdot12\,\text{A}\cdot18\,\text{A}}{2\pi\cdot0{,}4\,\text{m}} = 1{,}08\cdot10^{-4}\,\frac{\text{N}}{\text{m}}$ **Ответ:** $F/l = 1{,}08\cdot10^{-4}$ N/m.

2. Если на проводник длиной 0,5 m, расположенный под углом 45° к направлению силовых линий в магнитном поле с индукцией 0,4 Т, действует сила 0,42 Н, какова будет сила тока, проходящего через проводник?

Дано:	Формула:	Решение:
$B = 0{,}4$ T $\alpha = 45°$ $F_A = 0{,}42$ N $l = 0{,}5$ m $I = ?$	$F_A = IBl\sin\alpha$ $I = \frac{F_A}{Bl\sin\alpha}$	$I = \frac{0{,}42\,\text{N}}{0{,}4\,\text{T}\cdot0{,}5\,\text{m}\cdot0{,}7} = 2{,}97$ A **Ответ:** $I = 2{,}97$ A.

3. Найдите скорость электрона, движущегося в направлении, перпендикулярном силовым линиям магнитного поля, по окружности радиусом 1,5 cm в однородном магнитном поле с индукцией 10^{-3} Т. Масса электрона $9{,}1\cdot10^{-31}$ kg, а его модуль заряда равен $1{,}6\cdot10^{-19}$ С.

Дано:	Формула:	Решение:
$B = 1\cdot10^{-3}$ T $m = 9{,}1\cdot10^{-31}$ kg $R = 1{,}5\cdot10^{-2}$ m $\alpha = 90°$ $e = 1{,}6\cdot10^{-19}$ C $\upsilon = ?$	$F_Л = e\upsilon B\sin\alpha$ $F_{ц.б} = \frac{m\upsilon^2}{R}$ $F_Л = F_{ц.б}$ $\upsilon = \frac{eBR\sin\alpha}{m}$	$\upsilon = \frac{1{,}6\cdot10^{-19}\,\text{C}\cdot10^{-3}\,\text{T}\cdot1{,}5\cdot10^{-2}\,\text{m}\cdot1}{9{,}1\cdot10^{-31}\,\text{kg}} = 2{,}64\cdot10^{6}\,\frac{\text{m}}{\text{s}}$ **Ответ:** $\upsilon = 2{,}64\cdot10^6$ m/s.



Упражнение 39

1. По проволочному кольцу радиусом 4 cm протекает ток силой 0,8 A. Определите магнитную индукцию в центре кольца.

2. Прямой проводник длиной 10 cm с током 0,5 A помещён параллельно линиям индукции в однородном магнитном поле с индукцией 0,1 T. Какова сила действия магнитного поля на проводник?

3. Прямой проводник длиной 0,15 m с током 8 A помещён перпендикулярно силовым линиям в однородное магнитное поле с индукцией 0,4 T. Найдите работу, совершенную при перемещении проводника на расстояние 0,025 m в направлении силы Ампера.

4. Если ток магнитной индукции, проходящий через поверхность площадью 2 m^2, находящуюся в однородном магнитном поле с индукцией 0,2 T, равен 0,2 Wb, вычислите угол между нормалью к поверхности и вектором индукции.

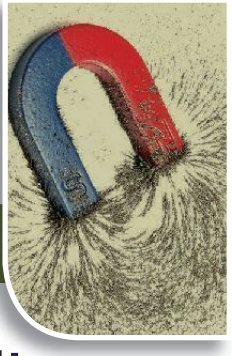
5. На частицу с зарядом 0,4 C, движущуюся со скоростью 1 km/s перпендикулярно линиям индукции магнитного поля, действует сила Лоренца, равная 4 N. Найдите индукцию магнитного поля.

6. Чему равен модуль силы, действующей на электрон, летящий в направлении, перпендикулярном линиям индукции, со скоростью 10^7 m/s в однородном магнитном поле с индукцией 4 T?

7. Если протон движется по окружности радиусом 10 cm в однородном магнитном поле с индукцией 0,167 T, какова его скорость? Примем массу протона равной $1{,}67 \cdot 10^{-27}$ kg.

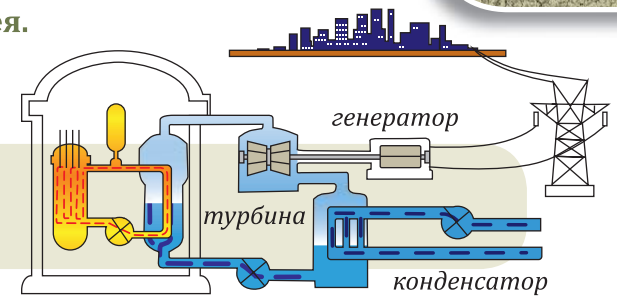
8. Когда протон входит в однородное магнитное поле с индукцией 40 mT, перпендикулярно силовым линиям, со скоростью $2 \cdot 10^6$ m/s, какой радиус окружности имеет его траектория? Примем массу протона равной $1{,}67 \cdot 10^{-27}$ kg.

9. Определите индукцию магнитного поля, если период вращения электрона, влетающего в линии однородного магнитного поля в вертикальном направлении, равен $20 \cdot 10^{-12}$ s. Примем массу электрона равной $9{,}1 \cdot 10^{-31}$ kg.



ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ ТЕМА 54

1. Явление электромагнитной индукции.
2. Индукционная электроэнергия. Закон Фарадея.

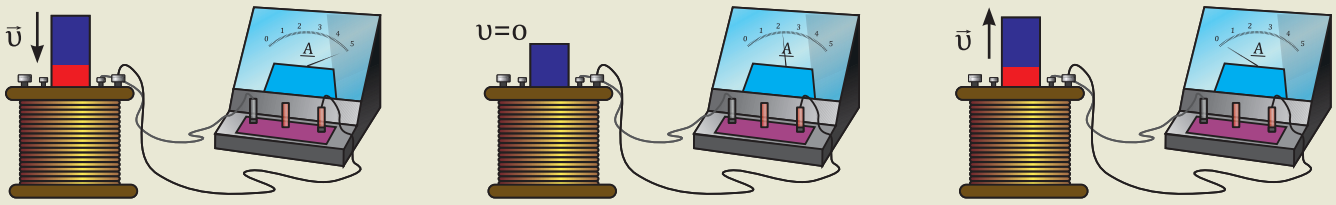


Как вырабатывается электричество?

1. Явление электромагнитной индукции

В 1820 г., после того как датский ученый Г. Эрстед открыл магнитное действие тока, английский ученый Майкл Фарадей поставил перед собой цель получить электрический ток посредством магнитного поля. Он работал над этим вопросом более 10 лет и добился своей цели в 1831 году.

М. Фарадей соединил катушку и гальванометр последовательно и образовал замкнутую цепь (рис. 7.30). При введении в катушку постоянного магнита наблюдается отклонение стрелки гальванометра. При этом в катушке возникает ток (рис. 7.30 *а*). Если магнит держать неподвижно внутри катушки, не перемещая его, то стрелка гальванометра будет показывать ноль, т. е. будет наблюдаться потеря тока в катушке (рис. 7.30 *б*). Когда магнит удаляют из катушки, в катушке снова образуется ток. При этом стрелка гальванометра отклоняется в обратную сторону (рис. 7.30 *в*). Наблюдаем это явление, даже если магнит покоится, а катушка приводится в движение.



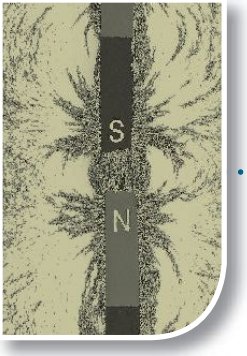
а) *б)* *в)*

Рис. 7.30

Анализируя результаты своих опытов, Фарадей пришел к следующему выводу: в замкнутом контуре индукционный ток возникает только тогда, когда поток магнитной индукции, проходящий через поверхность, ограниченную контуром проводника, изменяется, т. е. только при изменении магнитного потока. Этот вывод также называют законом электромагнитной индукции.

2. Индукционная электродвижущая сила. Закон Фарадея

Известно, что для того, чтобы в электрической цепи длительное время существовал ток, на каком-то участке цепи должен быть источник электродвижущей силы (ЭДС). ЭДС,



создающая индукционный ток, называется индукционной электродвижущей силой. Индукционная электродвижущая сила, создаваемая в замкнутом контуре, численно равна изменению магнитного потока, пересекающего этот контур, и противоположна по знаку:

$$\varepsilon_{инд} = -\Delta\Phi/\Delta t. \quad (1)$$

Это называется законом электромагнитной индукции или законом Фарадея-Максвелла.

Знак (–) в выражении (1) связан с направлением индуцированного тока в цепи, что объясняется по правилу Ленса.

За единицу индукционной электрической мощности в XBS принят вольт (V).

Если цепь состоит из *N* обмоток, индукция ЭДС, создаваемая в цепи, рассчитывается из следующего выражения:

$$\varepsilon_{инд} = -N\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (2)$$

Русский ученый Х. Ленс провёл следующий опыт, чтобы определить направление индукционного тока. Он подвесил на подставке лёгкие алюминиевые кольца, одно целое, а другое разрезанное (рис. 7.31). Если магнит приблизить ко всему кольцу, создаётся индукционный ток. В то же время этот ток создаёт внутри кольца собственное магнитное поле. Возникающее магнитное поле препятствует приближению магнита к кольцу и отталкивает его (рис. 7.31-*а*). Если начнем отодвигать магнит от кольца, кольцо будет притягиваться к магниту и следовать за ним. При приближении магнита к разрезанному кольцу или от него воздействия магнита на кольцо не наблюдается. Причина этого в том, что индукционный ток в петле не возникает из-за незамкнутой цепи (рис. 7.31-*б*). По результатам эксперимента Ленц нашёл правило определения направления индукционного тока. Это правило названо в его честь *правилом Ленца* и определяется следующим образом: индукционный ток, образующийся в замкнутой цепи, имеет такое направление, что сопротивляется изменению внешнего магнитного потока, создающего этот ток своим магнитным полем.

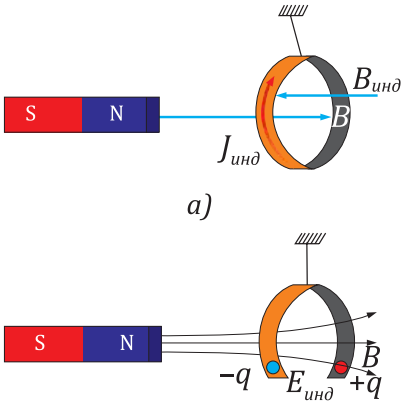


Рис. 7.31

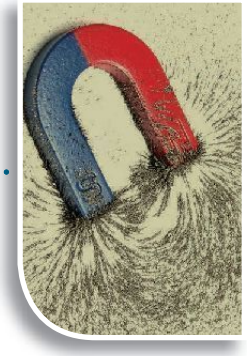


1. Объясните природу явления электромагнитной индукции.

2. Почему при приближении магнита к разрезанному кольцу они не взаимодействуют?

3. Объясните суть правила Ленца.

4. Как на практике используется электромагнитная индукция?



Пример решения задач

Магнитный поток, проходящий через проводящее кольцо, изменился на 5 mWb за 0,2 s. Если петля имеет электрическое сопротивление 0,25 Ω, найдите индукционный ток в петле.

Дано:	Формула:	Решение:
$\Delta t = 0{,}2$ s $\Delta\Phi = 5$ mWb $= 5\cdot10^{-3}$ Wb $R = 0{,}25\ \Omega$ $I = ?$	$\varepsilon_{инд} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ $I = \frac{\varepsilon_{инд}}{R} = \frac{\Delta\Phi}{R\cdot\Delta t}$	$I = \frac{5\cdot10^{-3}\ \text{Wb}}{0{,}25\cdot0{,}2\ \text{s}} = 0{,}1\ \text{A}$ **Ответ:** $I = 0{,}1$ A.

Упражнение 40

1. В соленоиде, состоящем из 100 витков, магнитный поток равномерно изменялся от $5\cdot10^{-3}$ до $2{,}5\cdot10^{-3}$ Wb за 0,005 s. Найдите ЭДС индукции в соленоиде.

2. При изменении магнитного потока, пересекающего поверхность, ограниченную контуром проводника, равномерно на 0,8 Wb, индукция ЭДС на контуре равна 1,6 V. Найдите время изменения магнитного потока. Чему равен индукционный ток, если сопротивление проводника 0,32 Ω?

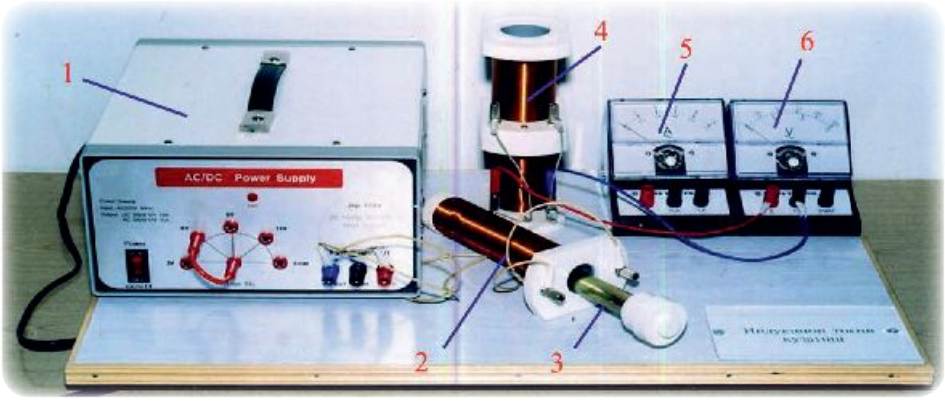
3. В соленоиде с 500 витками магнитный поток плавно изменялся от 7 mWb до 9 mWb за 5 ms. Найдите величину ЭДС индукции в соленоиде.

4. Найдите скорость изменения магнитного потока при пробуждении (образовании) ЭДС индукции 120 V в соленоиде с 2000 витками.

5. Милливольтметр присоединяют к рейкам железной проволоки, изолированной от земли и друг от друга. Что покажет милливольтметр (V), когда поезд проедет по железной дороге со скоростью 180 km/h? Вертикальная составляющая индукции магнитного поля Земли B = $0{,}2\cdot10^{-4}$ T, расстояние между рельсами 1 m.

ТЕМА 55

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ
ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ





Цель работы: наблюдать за формированием индукционного тока и индукционной электрической движущей силы, изучить зависимость индукционного тока от магнитного тока.

Необходимые инструменты и оборудование: источник переменного тока, амперметр и вольтметр переменного тока, катушки различной площади поперечного сечения, железная основа и соединительные провода.

Устройство и работа устройства

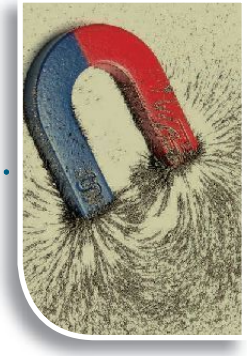
Общий вид устройства описан на рисунке 1 в этой теме. Устройство состоит из источника переменного тока (1), катушек (2 и 4), железной основы (3), амперметра переменного тока (5) и вольтметра (6). Катушки имеют разные поверхности поперечного сечения и могут быть полностью вложены друг в друга.

Первая катушка (2) с малой площадью поперечного сечения подключена последовательно к источнику переменного тока соединительными проводами.

Вторая катушка (4) с большой площадью поперечного сечения подключена к амперметру и вольтметру по очереди. Устройство запускается путём подключения к электрической сети переменного тока. Поскольку первая катушка подключена к сети переменного тока, вокруг катушки создаётся переменное магнитное поле. Когда первая катушка вставлена во вторую катушку, амперметр (или вольтметр), подключённый ко второй катушке, покажет, что в ней возник наведённый ток (или наведенная ЭДС).

Порядок работы

1. Подсоедините первую катушку с небольшой площадью поперечного сечения к клеммам источника переменного тока. При этом первая катушка не должна помещаться внутрь второй катушки.



2. Вторую катушку подключите последовательно с амперметром. В этом случае амперметр показывает значение 0.

3. Подключите источник питания к сети.

4. Отрегулируйте напряжение источника питания внешней цепи до 3 V.

5. Опустите первую катушку во вторую катушку.

6. Запишите значение наведённого тока во второй катушке с помощью амперметра.

7. Полностью вставьте железную основу в первую катушку и снова запишите показания амперметра.

8. Доведите напряжение источника тока во внешней цепи до 6 В и повторите опыт, как указано выше.

9. Повторите опыт, доведя последовательно напряжение источника тока во внешней цепи до 9 V и 12 V.

10. Отключите вторую катушку от амперметра, подключите её к вольтметру и проведите опыт для напряжения, подаваемого на первую катушку при 3 V, 6 V, 9 V и 12 V для случаев без и с железной основой внутри катушки. Запишите значения индукционных ЭДС, генерируемых во второй катушке.

11. Заполните следующую таблицу на основе полученных результатов.

№	Без железной основы			С железной основой		
	Напряжение, подаваемое на первую катушку U, (V)	Индукционный ток во второй катушке $I_{инд.}$, (A)	Индукция на второй катушке ЭДС $\mathcal{E}$, (V)	Напряжение, подаваемое на первую катушку U, (V)	Индукционный ток во второй катушке $I_{инд.}$, (A)	Индукция на второй катушке ЭДС $\mathcal{E}$, (V)
1						
2						
3						

Сделайте выводы по результатам эксперимента.



1. Опишите опыты Эрстеда и Фарадея над явлением электромагнитной индукции.

2. Объясните образование индукционного тока.

3. Объясните закон электромагнитной индукции и напишите его математическое выражение.

ТЕМА 56

САМОИНДУКЦИЯ. ИНДУКТИВНОСТЬ



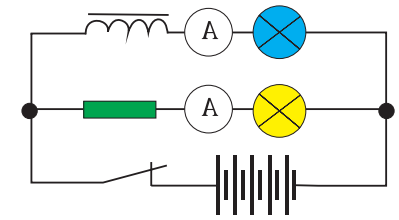
1. Явление самоиндукции.
2. Индуктивность.
3. Электродвижущая сила самоиндукции.

Когда вы отключаете некоторые радиоустройства, звук не исчезает внезапно, а постепенно затухает. Почему так происходит?

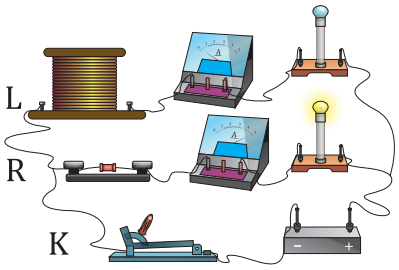
1. Явление самоиндукции

Ток, проходящий через любой контур, создаёт магнитный поток, пересекающий поверхность, ограниченную этим контуром. Если ток, протекающий через контур, изменяется, то и создаваемый им магнитный поток также изменяется. В результате в цепи образуется индукционная ЭДС. Это явление называется явлением самоиндукции.

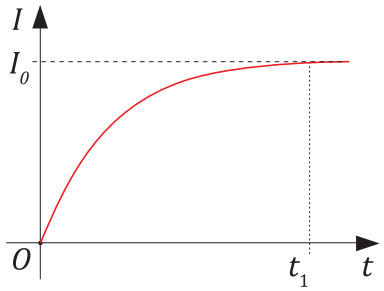
Электрическая цепь, в которой можно наблюдать явление самоиндукции, представлена на рис. 7.32 *а*. Схема состоит из двух одинаковых ламп, сопротивления R, многовитковой катушки, переключателя и источника постоянного тока. Одна из ламп подключается к источнику тока через катушку с железной основой внутри, другая через резистор R. При включении выключателя лампа, подключённая к цепи через катушку, немного задерживается, и видим, что вторая лампа, подключенная через сопротивление R, загорается сразу после включения выключателя (рис. 7.32 *б*). Потому что, как только переключатель включен, ток, проходящий через катушку, изменяется от нуля до I_0 за время t_1 (рис. 7.32 *в*). За это время в катушке возникает ток самоиндукции, противоположный току, создаваемому источником тока. Это приводит к тому, что первая лампочка загорается позже.



а)



б)



в)

Рис. 7.32

Также при выключении ключа вторая лампочка гаснет сразу, а первая гаснет медленно.

2. Индуктивность

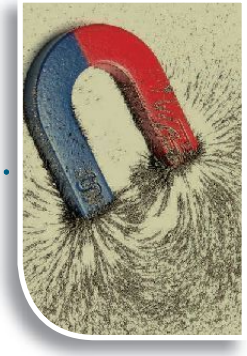
От каких физических величин зависит магнитный поток, создаваемый в катушке?

Обобщая результаты эксперимента, приходим к следующему выводу: магнитный поток, создаваемый проводником с током, зависит от протекающего по нему тока и свойств катушки, то есть:

$$\Phi = L \cdot I, \qquad (1)$$

где L — коэффициент пропорциональности, зависящий от геометрических размеров катушки и магнитных свойств среды, в которой находится катушка (основа катушки), и называется индуктивностью катушки.

В СИ единица индуктивности называется генри (Henry) (Н) в честь Дж. Генри, американского учёного, впервые наблюдавшего явление самоиндукции.



3. Электродвижущая сила самоиндукции

Согласно формуле (1), запишем выражение ЭДС самоиндукции, создаваемой в катушке, в виде:

$$\varepsilon_{\text{инд.}} = -\Delta\Phi/\Delta t = -L\,\Delta I/\Delta t \qquad (2)$$

Из этого выражения вытекает следующее: величина электродвижущей силы самоиндукции прямо пропорциональна скорости изменения тока в цепи (ΔI/Δt).

Из равенства (2) следует следующий физический смысл и единица измерения индуктивности (или коэффициента самоиндукции): если в цепи возникает один вольт ЭДС самоиндукции при скорости изменения силы тока 1 А/с, то индуктивность контура будет равна 1 Н, т.е.: $1\,\text{H} = \dfrac{1\,\text{V}}{1\,\text{A/s}} = \dfrac{1\,\text{V}\cdot\text{s}}{1\,\text{A}}$

Индуктивность длинной катушки или соленоида (рис. 7.33) длиной *l*, площадью поперечного сечения *S* и числом витков *N* определяется из следующего выражения:

$$L = \frac{\mu_0 \cdot \mu \cdot N^2 \cdot s}{l} \qquad (3)$$

Здесь: коэффициент μ_0 – магнитная постоянная вакуума, μ – магнитная проницаемость среды внутри соленоида.

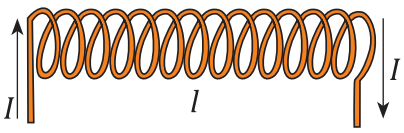


Рис. 7.33

Явление самоиндукции можно сравнить с явлением инерции в механике. В случае инерции индуктивность так же важна, как и масса тела. То есть, чем больше масса, тем инертнее тело, а чем больше индуктивность, тем медленнее (инертнее) изменение тока в цепи. В приведённом примере (рис. 7.32) можем видеть постепенный процесс включения и выключения лампы, соединённой последовательно с катушкой, медленное движение более инертного предмета и невозможность его внезапной остановки.



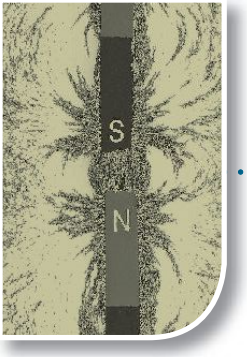
1. Объясните природу явления самоиндукции.

2. Нарисуйте электрическую цепь, в которой наблюдается явление самоиндукции, и опишите её.

3. Что такое индуктивность? Опишите её физический смысл.

4. Каково направление тока самоиндукции?

5. Приведите примеры явления самоиндукции.



Пример решения задач

Чему равна индуктивность катушки, если при равномерном изменении тока на катушке от нуля до 3 A за 0,2 s образуется ток индукции 1,5 V?

Дано:	Формула:	Решение:
$\Delta t = 0{,}2$ s $\Delta I = 3$ A $\varepsilon_{\text{инд.}} = 1{,}5$ V $L = ?$	$\varepsilon_{\text{инд.}} = -L\frac{\Delta I}{\Delta t}$ $L = \frac{\varepsilon_{\text{инд.}} \cdot \Delta t}{\Delta I}$	$L = \frac{1{,}5\,\text{V} \cdot 0{,}2\,\text{s}}{3\,\text{A}} = 0{,}1\,\text{H}$ **Ответ:** $L = 0{,}1$ H.

Упражнение 41

1. Через катушку с индуктивностью 0,8 N и поперечной гранью сечения 200 cm^2 проходит ток 2 A. Если катушка состоит из 50 катушек, какова индукция магнитного поля внутри неё?

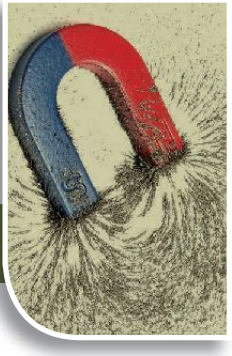
2. При равномерном увеличении тока, проходящего через катушку, от нуля до 5 A за 0,1 s образуется ЭДС самоиндукции 50 V. Найдите индуктивность катушки.

3. Если в катушке индуктивностью 0,12 H образуется ЭДС самоиндукции напряжением 6 V, как быстро изменится ток?

4. Чему равен индукционный ток на катушке (V), если ток, проходящий через катушку индуктивностью 2 H, за 0,2 s равномерно увеличился с 1 A до 5 A?

5. Сколько токов, проходящих через катушку индуктивностью 10 mH, создают магнитный поток 20 mWb?





Примеры решения задач

1. Если скорость изменения тока в соленоиде равна $\Delta I/\Delta t = 50$ A/s и на его концах образуется ЭДС самоиндукции 0,075 V, найдите индуктивность соленоида.

Дано:	Формула:	Решение:
$\frac{\Delta I}{\Delta t} = 50\frac{\text{A}}{\text{s}}$	$\varepsilon_{\text{сам.инд}} = -L\cdot\frac{\Delta I}{\Delta t}$	$L = \frac{0,075\,\text{V}}{50\,\text{A/s}} = 1,5\cdot10^{-3}\,\text{H}$
$\varepsilon_{\text{сам.инд}} = 0,075$ V	$L = \frac{\varepsilon_{\text{сам.инд}}}{\left\lvert\frac{\Delta I}{\Delta t}\right\rvert}$	**Ответ:** $L = 1,5\cdot10^{-3}$ H.
$L = ?$		

Упражнение 42

1. Катушка длиной 20 cm и диаметром 3 cm имеет 400 витков и пропускает ток 2 A. Найдите индуктивность катушки и магнитный поток через поперечное сечение катушки.

2. Чтобы индуктивность катушки диаметром 4 cm была равна 0,001 H, сколько витков надо намотать из провода диаметром 0,6 mm, сделав его плотным в один слой?

3. При увеличении тока, проходящего через катушку равномерно от нуля до 5 A в течение 0,1 s, образуется ЭДС самоиндукции 50 V. Найдите индуктивность катушки.

4. В катушке с 250 витками магнитный поток изменился на 2 Wb за 0,4 s. Найдите ЭДС индукции в катушке.

5. Если сила тока в соленоиде 5 A и в нём создается магнитный поток 50 mWb, какова индуктивность соленоида?

6. Скольким веберам будет равен магнитный ток, проходящий через цепь с индуктивностью 0,4 H при силе тока 2 A?

7. За 5 ms магнитный поток в соленоиде изменяется с 3 mWb до 9 mWb. Какое число витков в соленоиде, если ЭДС, создаваемая в соленоиде, равна 60 V?

8. Магнитный поток 0,6 Wb проходит через плоский контур перпендикулярно вектору индукции магнитного поля. Если магнитная индукция равна 0,2 T, какова площадь поверхности цепи?

9. Если магнитный поток, равный 1Wb, проходит через плоский контур с площадью поверхности 2 m^2 и перпендикулярен вектору индукции магнитного поля, чему равна магнитная индукция (T)?

10. Если цепь с индуктивностью 2 mH создаёт магнитный поток 10 mWb, какой ток проходит через цепь (A)?



ТЕМА 58

ЭНЕРГИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ТОКА. МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВ

1. Энергия магнитного поля проводника с током.
2. Магнитные свойства веществ.
3. Магнитная проницаемость среды.

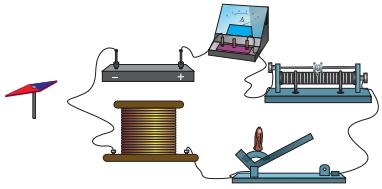


Вы замечали, что магнит притягивает железные предметы, но не притягивает такие предметы, как резина, дерево, стекло. Как вы думаете, почему?

1. Энергия магнитного поля тока

Подобно тому, как заряженное тело обладает энергией электрического поля, магнитное поле, создаваемое вокруг проводника с током, также обладает энергией. Расчёт энергии магнитного поля рассмотрим на следующем примере. Катушка индуктивностью L подключена последовательно к источнику тока через реостат (рис. 7.34).

Часть энергии электрического тока, проходящего через катушку, используется для создания в ней магнитного поля. Согласно закону сохранения энергии, энергия, произведённая током, равна работе, затраченной на создание магнитного потока, то есть: $W_{маг}$ = A.



7.37-rasm

Двигаем ползунок реостата и увеличиваем ток, проходящий через катушку. Создаваемый в катушке магнитный поток ($F = L \cdot I$) прямо пропорционален проходящему через неё току, т. е. с увеличением тока линейно возрастает и магнитный поток (рис. 7.35). Геометрический смысл площади треугольника, приведённый на чертеже, объясняет совершаемую работу. Численное значение этой площади:

$$A = (I \cdot \Phi)/2 \qquad (1)$$

В этом случае формула для расчёта энергии магнитного поля, создаваемого вокруг проводника с током, будет выглядеть так:

$$W_{маг} = A = \frac{I \cdot \Phi}{2} = \frac{L \cdot I^2}{2} \qquad (2)$$

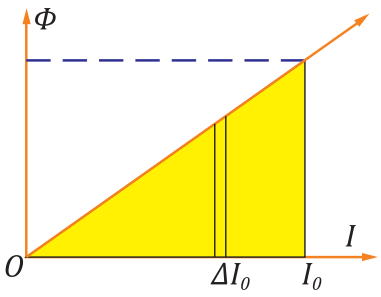
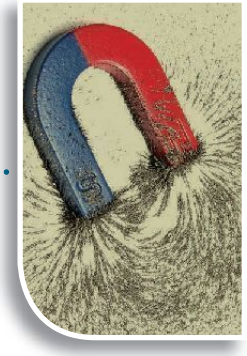


Рис. 7.35

Итак, энергия магнитного поля цепи с током равна половине произведения её индуктивности на квадрат тока, проходящего через цепь.

Основная часть энергии магнитного поля соленоида с током заключена внутри соленоида. Поле внутри соленоида можно считать однородным магнитным полем. Величина, определяемая отношением энергии однородного магнитного поля внутри соленоида к внутреннему объёму соленоида, называется плотностью энергии магнитного поля:

$$\bar{\omega}_{маг} = \frac{W_{маг}}{V} = \frac{W_{маг}}{Sl} \qquad (3)$$



Здесь S – площадь поперечного сечения соленоида, а l – длина соленоида. В СИ плотность энергии магнитного поля измеряется в J/m^3.

Как видно из равенства (2), сравнивая выражение энергии магнитного поля тока с выражением кинетической энергии движущегося тела $E_K=(m\cdot V_2)/2$, видим, что индуктивность является физической величиной, аналогичной массе в механике, а сила тока аналогична скорости. Как упоминалось выше, точно так же, как масса тела играет роль в изменении его скорости в механике, индуктивность играет роль в изменении тока в цепи.

Электромагниты используются для создания сильного магнитного поля. Основой электромагнита является соленоидная катушка. Вставленный в соленоид ферромагнитный сердечник резко увеличивает его индуктивность. В результате магнитное поле вокруг электромагнитной катушки также увеличивается, и она легко поднимает большие грузы. Электромагнитные краны, способные поднимать тяжелые грузы, широко применяются в различных отраслях народного хозяйства (рис. 7.36).

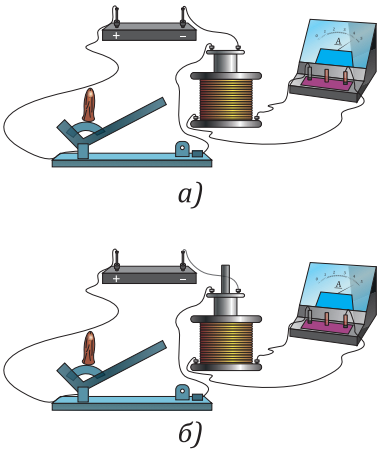


Рис. 7.36

2. Магнитные свойства веществ

Многие вещества (например, железо, никель, кобальт) намагничиваются при помещении их в магнитное поле или при пропускании через них тока. Они создают вокруг себя магнитное поле, подобное постоянному магниту. Такие вещества, которые намагничиваются под действием магнитного поля, называются магнетиками.

В теме 47 мы видели, что магнитное поле, создаваемое внутри катушки с током, пропорционально току, проходящему через катушку. Для оценки магнитного поля внутри катушки можно провести следующий эксперимент. Общий вид демонстрационного устройства представлен на рис. 7.37 *а*. Демонстрационное устройство состоит из источника переменного тока, двух катушек разной площади поперечного сечения, сердечников из разных материалов, амперметра и переключателя. Первую катушку с малым сечением подключаем к источнику питания через переключатель и вставляем во вторую катушку. Подключаем вторую катушку к гальванометру. Если мы подключим переключатель, то по показанию гальванометра определим, что ЭДС индукции образуется во второй катушке за счет явления электромагнитной индукции.



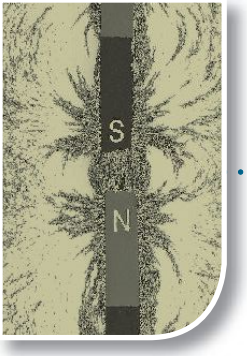
а)

б)

Рис. 7.37

Не изменяя напряжения в катушке, в первую катушку поочередно вставляют металлические сердечники разной природы, и при повторении опыта будут наблюдаться разные изменения отклонения стрелки гальванометра из-за разной индукции магнитного поля внутри неё (рис. 7.37 *б*). Попробуйте провести этот эксперимент.

Следовательно, разные вещества создают в катушке разные магнитные поля.



3. Магнитная проницаемость среды

Индукция магнитного поля, создаваемого внутри катушки, зависит от природы введенного в нее вещества, т. е.:

$$B = \mu \cdot B_0 \qquad (4)$$

Поэтому индукция магнитного поля (B), создаваемая катушкой с током в среде, прямо пропорциональна индукции магнитного поля (B_0), создаваемой ею в вакууме, а также зависит от типа среды. Если найдём m из выражения (4):

$$\mu = B/B_0 \qquad (5)$$

μ в этом уравнении называется магнитной проницаемостью среды. Она зависит только от природы среды и показывает, во сколько раз индукция поля в среде отличается от индукции магнитного поля в вакууме.

Все вещества, встречающиеся в природе, делятся на три типа в зависимости от их магнитной проницаемости. Это диамагнетики, парамагнетики и ферромагнетики.

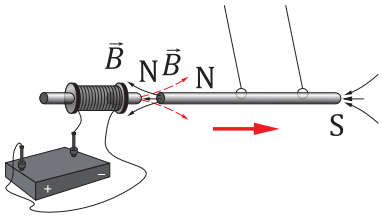


Рис. 7.38

Вещества с магнитной проницаемостью меньше единицы ($\mu < 1$) называют диамагнетиками. Золото, серебро, висмут, медь, цинк и некоторые газы диамагнитны. Диамагнетики ослабляют магнитное поле. При приближении к таким веществам магнитного поля они удаляются от поля (рис. 7.38).

Вещества с магнитным поглощением чуть больше единицы ($\mu > 1$) называются парамагнетиками.

К парамагнитным веществам относятся платина, алюминий, хром, марганец и кислород. Парамагнетики, введённые в магнитное поле, частично его усиливают.

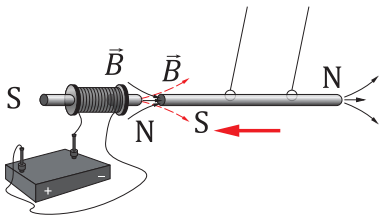


Рис. 7.39

Вещества с магнитной восприимчивостью больше единицы ($\mu >> 1$) называются *ферромагнетиками*. Железо, никель, кобальт и некоторые их сплавы являются ферромагнитными. Ферромагнетики, введённые в магнитное поле, усиливают его. Предметы из таких веществ притягиваются к полю, когда их помещают в магнитное поле (рис. 7.39).

Хотя ферромагнетики в природе немногочисленны, они широко используются в современной технике. Например, из ферромагнитных материалов изготавливают сердечники трансформаторов, генераторов тока, электродвигателей и других устройств.

В последнее время постоянные магниты широко используются в медицине. Из них делают браслет, который можно носить как устройство для снижения кровяного давления.



1. Объясните расход энергии тока, проходящего через катушку.

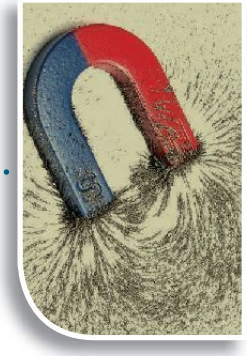
2. Объясните энергию магнитного поля.

3. Какие вы знаете устройства, работающие за счёт энергии магнитного поля?

4. Опишите магнетики.

5. Объясните физический смысл магнитной проницаемости.

6. Как классифицируются вещества по их магнитной проницаемости?



Пример решения задач

Ферромагнетик с магнитной проницаемостью 60 был вставлен в катушку без сердечника с индукцией магнитного поля 0,5 Т. Насколько изменится индукция магнитного поля в катушке?

Дано:	Формула:	Решение:
$B_0 = 0{,}5$ Т $\mu = 60$ ΔB = ?	$B = \mu \cdot B_0$ $\Delta B = \mu \cdot B_0 - B_0$	$\Delta B = (60 \cdot 0{,}5 - 0{,}5)$ Т $= (30 - 0{,}5)$ Т $= 29{,}5$ Т **Ответ:** $\Delta B = 29{,}5$ Т.

Упражнение 43

1. Если энергия магнитного поля, образующегося при прохождении через катушку тока силой 2 А, равна 2 J, какова индуктивность катушки?

2. Какой должна быть сила тока в дросселе индуктивностью 0,5 Н, чтобы энергия поля была равна 1 J?

3. Соленоид длиной 50 cm и площадью поперечного сечения 2 cm^2 имеет индуктивность $2 \cdot 10^{-7}$ Н. В соленоид вставлен железный сердечник. При какой силе тока плотность энергии магнитного поля достигнет значения 10^{-3} J/m^3?

4. По рисунку 7.40 найдите магнитную проницаемость стали (B_0) в случаях, когда индукция намагничивающего поля равна 0,4 mT и 1,3 mT.

5. Если чугунный сердечник соленоида заменить стальным сердечником того же размера, во сколько раз изменится магнитный поток в соленоиде? Индукция магнитного поля $B_0 = 2{,}2$ mT. Используйте рисунок 7.40.

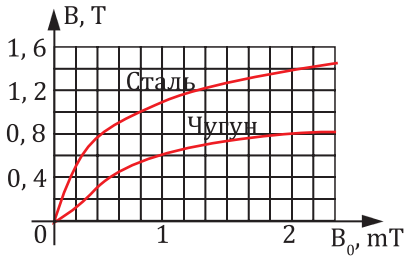
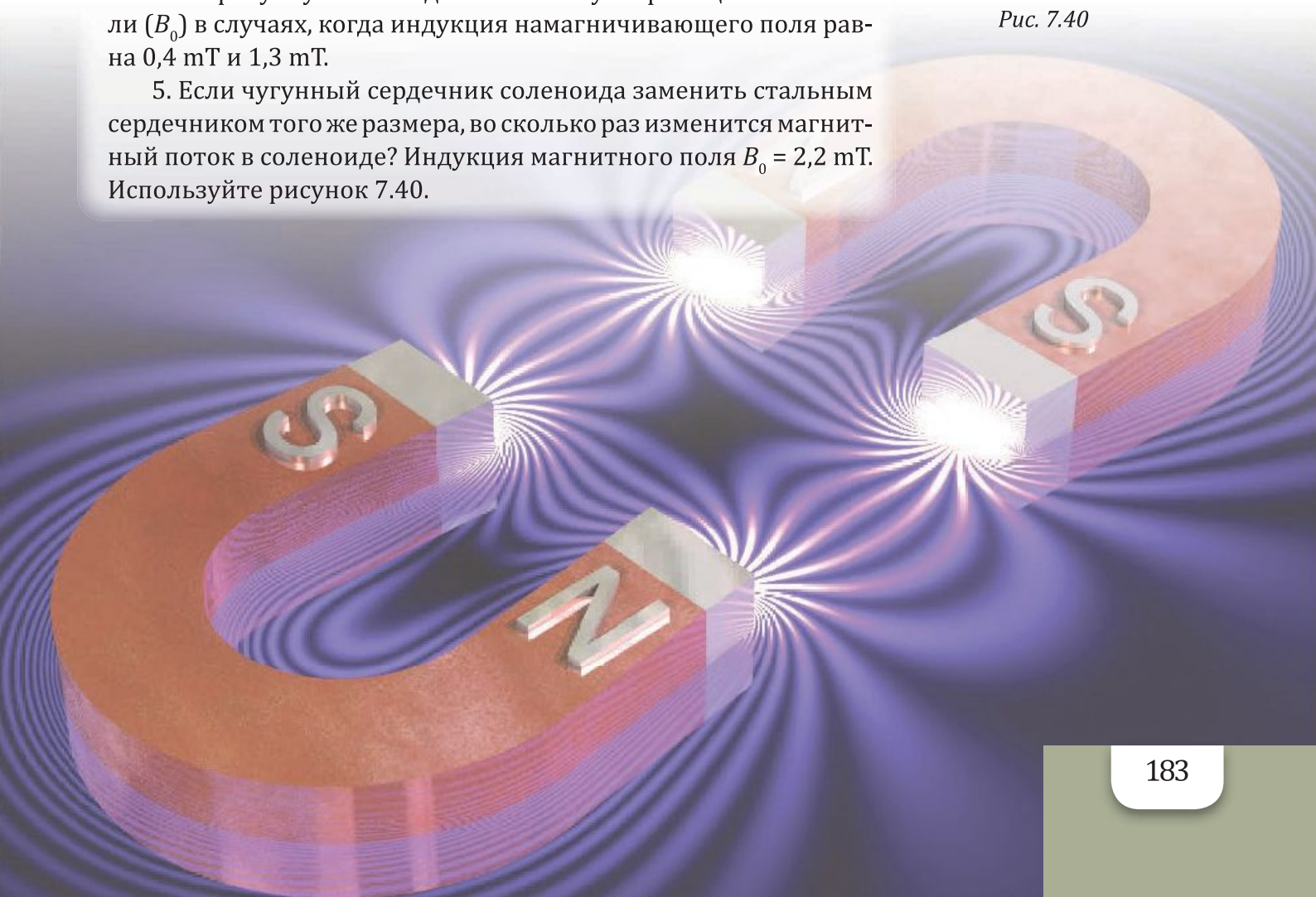
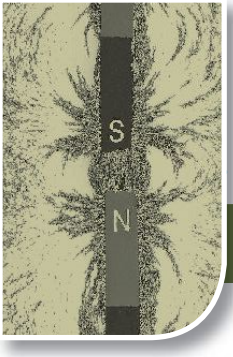


Рис. 7.40





ТЕМА 59 РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Примеры решения задач

1.Если по катушке с индуктивностью, равной 0,6 N, протекает ток силой 5 A, найдите энергию магнитного поля, создаваемого в катушке.

Дано:	Формула:	Решение:
$L = 0{,}6$ H $I = 5$ A	$W_{маг} = \frac{LI^2}{2}$	$W_{маг} = \frac{0{,}6\,\text{H}\cdot(5\,\text{A})^2}{2} = 7{,}5\,\text{J}$
$W_{маг} = ?$		**Ответ:** $W_{маг} = 7{,}5$ J.

2. Какой должна быть сила тока в катушке с индуктивностью 0,2 N, чтобы энергия магнитного поля была 4 mJ?

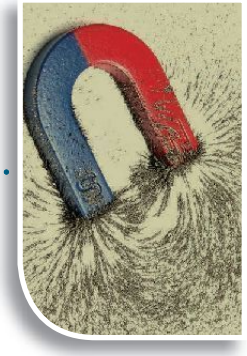
Дано:	Формула:	Решение:
$W = 4$ mJ $= 4\cdot10^{-3}$ J $L = 0{,}2$ H	$W_{маг} = \frac{LI^2}{2}$ $I = \sqrt{\frac{2\cdot W_{маг}}{L}}$	$I = \sqrt{\frac{2\cdot4\cdot10^{-3}\ \text{J}}{0{,}2\ \text{H}}} = 0{,}2\ \text{A}$
$I = ?$		**Ответ:** $I = 0{,}2$ A.

3. Индукция магнитного поля в катушке с током в вакууме равна $B_0 = 2\cdot10^{-4}$ T. Если в катушку вставить стальной сердечник, и его индукция возрастет до $B = 1{,}2$ T, найдите магнитное поглощение стали при этих условиях.

Дано:	Формула:	Решение:
$B_0 = 2\cdot10^{-4}$ T $B = 1{,}2$ T	$B = \mu B_0$ $\mu = B/B_0$	$\mu = \frac{1{,}2\,\text{T}}{2\cdot10^{-4}\ \text{T}} = 6000$
$\mu = ?$		**Ответ:** $\mu = 6000$.

4. Индукция магнитного поля внутри сферы без сердечника равна $B_0 = 2\cdot10^{-4}$ T. Если внутри катушки намотан никелевый сердечник, найдите индукцию магнитного поля в сердечнике и ток магнитной индукции, проходящий через сечение сердечника $S = 10$ cm^2.

Дано:	Формула:	Решение:
$B_0 = 2\cdot10^{-4}$ T $\mu = 800$ $S = 10\ \text{cm}^2 = 10^{-3}\ \text{m}^2$	$B = \mu B_0$ $\Phi = BS$	$B = 800\cdot2\cdot10^{-4}\ \text{T} = 16\cdot10^{-2}\ \text{T}$ $\Phi = 16\cdot10^{-2}\ \text{T}\cdot10^{-3}\ \text{m}^2 = 16\cdot10^{-5}\ \text{Wb}$
$B = ?$ $\Phi = ?$		**Ответ:** $B = 16\cdot10^{-2}$ T; $\Phi = 16\cdot10^{-5}$ Wb.



Упражнение 44

1. Соленоид длиной 60 cm и площадью поперечного сечения 4 cm^2 имеет индуктивность $4 \cdot 10^{-7}$ H. Какой силы должен быть ток, протекающий через соленоид, чтобы плотность энергии магнитного поля внутри соленоида была $2 \cdot 10^{-3}$ J/m^3?

2. Есть два совершенно одинаковых стальных стержня. Один из них намагничен. Как определить, какой из них намагничен, не имея в своём распоряжении никаких вспомогательных средств?

3. В соленоиде создается магнитный поток 0,5 Wb при силе тока 10 A. Найдите энергию магнитного поля этого соленоида.

4. Сердечник токового соленоида изготовлен из никеля, площадь поперечного сечения 20 cm^2, магнитный поток $1{,}256 \cdot 10^{-2}$ Wb. Если индукция однородного магнитного поля внутри соленоида равна 31,4 mT, найдите магнитное поглощение никеля при этих условиях.

5. Индукция поля внутри металлического корпуса равна 5 T, индукция внешнего магнитного поля 2,5 mT. Найдите магнитную восприимчивость металла.

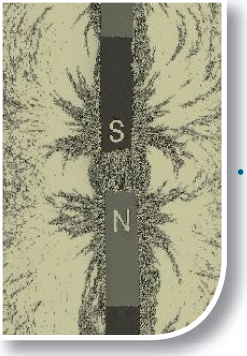
6. Индукция магнитного поля в катушке без сердечника равна 25 mT. Если в катушку вставить ферромагнитный сердечник с магнитной проницаемостью 60, какова будет индукция магнитного поля в катушке?

7. По соленоидной катушке без сердечника длиной 0,4 m, площадью поперечного сечения 2 cm^2 и числом витков на единицу длины, равным 25 1/cm, протекает ток силой 0,8 A. Найдите энергию магнитного поля, создаваемого внутри соленоида.

8. Какова индуктивность катушки, если энергия её магнитного поля равна 60 mJ при прохождении через катушку тока силой 3 A?

9. Найдите индуктивность катушки длиной 40 cm, площадью поперечного сечения 4 cm^2 и числом витков, равным 800. Магнитное поглощение материала сердечника катушки равно 500.

10. Если известно, что магнитный поток, проходящий через определенное сечение никеля, в 2 раза меньше магнитного потока, проходящего через такое же сечение стали с магнитной проницаемостью 634, найдите магнитную проницаемость никеля.



ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ ПО ЗАВЕРШЕНИЮ ГЛАВЫ VII

1. К батарее аккумуляторов присоединены параллельно две цепи. Одна содержит лампы накаливания, другая – большой электромагнит. Величина силы тока в обеих цепях одна и та же. При размыкании какой из цепей будет наблюдаться более сильная искра? Почему?

2. Железный кубик, лежащий на гладкой горизонтальной стеклянной поверхности, притягивается к магниту, скользя по стеклу. Как движется кубик: равномерно, равноускоренно или равномерно-ускоренно? Ответ поясните.

3. При прохождении тока через какие среды наблюдается магнитное действие электрического тока?

4. Какие поля образуются вокруг проводника при прохождении по нему постоянного тока?

5. Ток силой 2 A протекает через токоведущую рамку площадью 0,05 m^2, помещённую в однородное магнитное поле. Чему равна индукция поля, если максимальный вращающий момент равен 40 mN·m?

6. Электроны и протоны влетают в магнитное поле в направлении, перпендикулярном линиям индукции. Масса протона в 1800 раз больше массы электрона. Какая из частиц обладает наибольшей силой Лоренца? Поясните свой ответ.

7. Магнитный поток, пересекающий контур, плавно изменялся от 5 Wb до 13 Wb за 0,4 s. Найдите индукционную ЭДС, в цепи.

8. Сколько было витков в катушке, если в катушке образовалась ЭДС 120 V при скорости изменения магнитного потока 0,15 Wb/s?

9. Какой магнитный поток возникает в катушке индуктивностью 80 mH при силе тока 0,6 A?

10. Какой должна быть скорость изменения тока, проходящего через катушку, чтобы величина собственной индуктивности ЭДС в катушке с индуктивностью 2 H была равна 3,6 V?

11. Индукция магнитного поля в катушке с током равна 20 mT. При вставлении в катушку ферромагнитного сердечника индукция создаваемого в нём магнитного поля увеличивается до 180 mT. Чему равно магнитное поглощение вставленного в катушку сердечника?

12. По катушке радиусом 2 cm протекает ток силой 3 A. Если в катушку вставить ферромагнитный сердечник с магнитной проницаемостью 20, какова будет индукция магнитного поля внутри катушки? Длина катушки 20 cm, количество витков равно 150.

13. Найдите энергию магнитного поля, если по соленоиду протекает ток 2,5 A и в нём появляется магнитный поток, равный 0,8 mWb.

14. По катушке с индуктивностью 5 мН протекает ток силой 0,4 A. Найдите энергию магнитного поля.

ОТВЕТЫ К УПРАЖНЕНИЯМ

Упражнение 1. **1.** 100 N, первая направлена в сторону группы, т. к. находится в направлении большой силы; **2.** Под углом 90°; **3.** 0,4 m/s^2; 0,3 m/s^2; **4.** в сторону F_4.

Упражнение 2. **1.** Уменьшится в 4 раза; **2.** Увеличится в 4 раза; **3.** Равен 3 m ; **4.** 1128,96 N; **5.** 6 kN; увеличится в 4 раза.

Упражнение 3. **1.** 8 N в направлении F_2; **2.** 1 kg; **3.** a) 50 N; b) 200 N; **4.** 0,25 m/s^2; 0,2 m/s^2; **5.** 8,3 km/s; **6.** 2 km/s; **7.** Уменьшится в 8 раз; **8.** 9 km/s; **9.** 16 km/s;

Упражнение 4. **1.** 1,3 t; **2.** 4,2 kN; **3.** 720 N; **4.** 663 N; **5.** 4,5 kN.

Упражнение 5. **1.** 0,2 N; **2.** 0,981 m; **3.** 0,392 N; **4.** 1,22.

Упражнение 6. **1.** 312,5 kg; **2.** ≈15,8 m/s; **3.** 600N, 300N; **4.** 2,4525 m/s^2; **5.** g/3; **6.** 3,27 m/s ^{2}; **7.** 3 m/s; **8.** 46400 N; **10.** 950 N;

Упражнение 7. **1.** 220N; 20 N; **2.** 1287 N; **3.** m = 3,9 kg ;

Упражнение 8. **1.** 16 J; **2.** 83,3%; **3.** 62,5%; **4.** N = 50 W;

Упражнение 9. **1.** 1,5 m; **2.** 15,6 m; 3,1 s; **3.** 505 m; 8,1 m/s^2; **4.** 26,4kW; **5.** ≈ 67%; **6.** μ = tgα; **7.** 88,2%; **8.** 442,2·105 J; **9.** 12152 J; 65,8 %;

Упражнение 10. **1.** 360 N; **2.** 600 N; **3.** Невозможно получить прибыль от работы любым простым механизмом; **4.** 500 N; **5.** 10 cm, 30 cm.

Упражнение 11. **1.** 1,5,3 указатели могут проходить через центр масс объекта; **2.** 2 N; **3.** 2 kg; **4.** 0,75m; **5.** d_1; **6.** l_1 = 60 cm; l_2=20 cm, так как 20 km от большой нагрузки; **7.** 1200 N.

Упражнение 12. **1.** 0,2 m; 8 s; 0,1 m; **2.** 40 cm ; **3.** 0,06 m; 50 Hz; 0,02 s; **4.** 0,2 m; π; $\pi/2$;

Упражнение 13. **1.** Уменьшится в 4 раза; **2.** 0,25 Hz; **3.** 0,314 s; **4.** 1,2 π;

Упражнение 14. **1.** 3 s; **2.** 2 m; **3.** 0,5 m/s; **4.** 0,5 m;

Упражнение 15. **1.** 1,2 km; **2.** Не меняется; **3.** 1,6 s.

Упражнение 16. **1.** 4 kg; **2.** $l_2 = 9l_1$; **3.** 1 m; **4.** 0,06 m; 0,67s; 1,5 Hz; **5.** 20 Hz; **6.** 2550 m; **7.** 0,4 s; **8.** 450 m; **9.** Судья должен включить секундомер, когда увидит искру из дула пистолета, потому что время истечет, если он дождется звука. Скорость распространения звука во много раз меньше скорости распространения света; **10.** 1500 m/s.

Упражнение 17. **1.** 250 kPa; **2.** Уменьшится в 2,8 раза; **3.** $p_1 > p_2 > p_3$; **4.** 720 kg.

Упражнение 18. **1.** 5 m/s; **2.** 0,5 m/s; **3.** Увеличится в 1,21 раза; **4.** 0,45 cm/s; **5.** 8 m/s; **6.** 40 kN; **8.** 1382,4 kg; **9.** 10 m/s.

Упражнение 19. **1.** K (–); L (–). **2.** 20 nN. **3.** = 29412 C. **4.** 0,1 mm. **5.** 18 g.

Упражнение 20. **1.** 9,26 mA. **2.** 4,032 kg. **3.** 182 cm^2. **4.** 5,47 g. **5.** 3,3·10^{-7} kg/C. **6.** 4,125 mg. **7.** 98,3 kW. **8.** 130 kJ.

Упражнение 21. **1.** 15,6 V. **2.** 20 kA; 40 TW; 200 GJ. **3.** 1,2 ms. **4.** 6,4 mA.

Упражнение 22. **1.** 9,26 mA. **2.** 4,032 kg. **3.** 182 cm^2. **4.** 5,47 g. **5.** 3,3·10^{-7} kg/C. **6.** 4,125 mg. **7.** 98,3 kW. **8.** 130 kJ.

Упражнение 23. **1.** 9,26 mA. **2.** 4,032 kg. **3.** 182 cm^2. **4.** 5,47 g. **5.** 3,3·10^{-7} kg/C. **6.** 4,125 mg. **7.** 98,3 kW. **8.** 130 kJ.

Упражнение 24. **1.** 9,26 mA. **2.** 4,032 kg. **3.** 182 cm^2. **4.** 5,47 g. **5.** 3,3·10^{-7} kg/C. **6.** 4,125 mg. **7.** 98,3 kW. **8.** 130 kJ.

Упражнение 25. **1.** 9,26 mA. **2.** 4,032 kg. **3.** 182 cm^2. **4.** 5,47 g. **5.** 3,3·10^{-7} kg/C. **6.** 4,125 mg. **7.** 98,3 kW. **8.** 130 kJ.

Упражнение 26. **1.** 1·10^{14} ta. **2.** 3 kV/m. **3.** 0,1 A. **4.** 3·10^{20} ta. **5.** 6000 C.

Упражнение 27. **1.** 1,8 Ω. **2.** 14 V. **3.** 1 Ω. **4.** 4 V. **5.** 5 A

Упражнение 28. **1.** 30 A. **2.** 64·10^{14} A/m^2. **3.** 1,2 V. **4.** 1 A; 0,8 A; 0,2 A; V; V; V; V.

Упражнение 29. **1.** 0,2 ^{0}C. **2.** в 1,3 раза. **3.** 20,2 Ω. **4.** 2 J; 0,2 W. **5.** 4,8 mJ.

Упражнение 30. **1.** 10,6 cm. **2.** 32,3 cm. **3.** 3,2·10^{-19} C. **4.** 7·10^{14} m/s^2. **5.** 0,32 pN.

Упражнение 31. **1.** Увеличится в 4 раза. **2.** 33 mg. **3.** 29412 C. **4.** 0,1 mm. **5.** 18 g.

Упражнение 32. **1.** 9,26 mA. **2.** 4,032 kg. **3.** 182 cm^2. **4.** 5,47 g. **5.** $3{,}3 \cdot 10^{-7}$ kg/C. **6.** 4,125 mg. **7.** 98,3 kW. **8.** 130 kJ.

Упражнение 33. **1.** 15,6 V. **2.** 20 kA; 40 TW; 200 GJ. **3.** 1,2 ms. **4.** 6,4 mA.

Упражнение 34. 1. $28 \cdot 10^{-6}$ T. **2.** 14 A. **3.** 5 mT. **4.** $2{,}5 \cdot 10^{-5}$ T.

Упражнение 35. **1.** 0,8 T. **2.** $4 \cdot 10^{-2}$ T. **3.** 17°. **4.** 15 A.

Упражнение 36. **1.** 1 N. **2.** $0{,}125 \cdot 10^{-4}$ N. **3.** 20 A.

Упражнение 37. **1.** $6{,}25 \cdot 10^{-4}$ Wb. **2.** 0,2 T. **3.** 5 W. **4.** 2 J; 0,2 W. **5.** 4,8 mJ.

Упражнение 38. **1.** 10,6 cm. **2.** 32,3 cm. **3.** $3{,}2 \cdot 10^{-19}$ C. **4.** $7 \cdot 10^{14}$ m/s^2. **5.** 0,32 pN.

Упражнение 39. **1.** $12{,}56 \cdot 10^{-6}$ T. **2.** 0.3, 12 mJ. **4.** 60°. **5.** 0,01 T. **6.** 6,4 pN. **7.** $1.6 \cdot 10^6$ m/s. **8.** 52,2 cm. **9.** 1,78 T.

Упражнение 40. **1.** 50 V. **2.** 0,5 s; 0,5 A. **3.** 200 V. **4.** 0,06 Wb/s. **5.** 1 mV.

Упражнение 41. **1.** 1,6 T. **2.** 1 H. **3.** 50 A/s. **4.** 40 V. **5.** 2 A.

Упражнение 42. **1.** 0.71 mH; 1.42 mWb. **2.** 380 ta. **3.** 1 H. **4.** 1250 V; **5.** 10 mH. **6.** 0,8 Wb. **7.** 50 ta. **8.** 3 m^2. **9.** 0,5 T. **10.** 5 A.

Упражнение 43. **1.** 1 H. **2.** 2 A. **3.** 1 A. **4.** 2; 0,92. **5.** Увеличится в 1,75 раза.

Упражнение 44. **1.** 1,55 A. **3.** 2,5 J. **4.** 5. **5.** 2000. **6.** 1,5 T. **7.** 0,2 mJ. **8.** 13,3 mH. **9.** 0,4 H. **10.** 317.

ОТВЕТЫ НА ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ ПО ГЛАВЕ I

1. 2 *N* и 10 *N* не могут быть одинаково эффективны; **2**. На расстоянии 2*R*; **3.** 10 cm; 90 cm; **4**. $16{,}5\cdot10^{2}$ m/c; **5**. 1 s; **6.** *m*gsinα; **7**. tgα; **8**. 10 раз; **9**. 360 N; 440N; **10**. 5 kN.

ОТВЕТЫ НА ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ ПО ГЛАВЕ II

1. 16 cm; 0; **2.** 0,5 Hz; 2 s; **3.** $T_2=T_1$; **4**. 2,5 T_1; **5**. 0,1 sin 4πt; **6**. 6,28 s; 0,05 m; **7**. 0,001sin 20πt; **8**. 80 cm **9**. 10 cm; **10.** 18 m; 11. 2,4 m/s;

ОТВЕТЫ НА ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ ПО ГЛАВЕ III

1. 5; 2. 8 m/s; **3**. $1\cdot10^{-3}$ m^2; **4**. 720 kg; **5**. В широкой части трубы гидростатическое давление велико, гидродинамическое давление мало, то есть скорость потока мала, а в узкой части гидростатическое давление мало, гидродинамическое давление велико, скорость потока большая. При этом давление в части 2 невелико; **6**. 1/5.6 будет меньше; **7**. – гидродинамическое давление потока жидкости; **8**. 1,38 cm; **9**. 3 *l*.

ОТВЕТЫ НА ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ ПО ГЛАВЕ IV

1. 3 Ω. **2.** 5,26 mg. **3.** 1224 g. **4.** 12 g. **5.** 1 A. **6.** 20 C. **7**. $3{,}92\cdot10^{-18}$ J. **8.** $2{,}26\cdot10^{6}$ m/s. **9**. 13,88 V. **10**. Увеличился в 3 раза.

ОТВЕТЫ НА ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ ПО ГЛАВЕ V

1. $C_2 = 81\ C_1$ **. 2**. 30 cm. **3.** 3600 V/m. **4.** 50 nC. **5**. 150 V. **6**. – 30 kV. **7**. 243 nJ. **8**. 1500 V/m. **9**. 120 V. **10**. 6 mJ. **11**. 1 kV. **12**. 159,3 μJ/m^3 **. 13**. $4{,}8\cdot10^{15}$ m/s^2 **. 14**. На расстоянии 3 cm от центра равен 0; на расстоянии 4 cm от поверхности 21,6 kV/m.

ОТВЕТЫ НА ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ ПО ГЛАВЕ VI

1. 3 Ω. **2.** 5,26 mg. **3.** 1224 g. **4.** 12 g. **5.** 1 A. **6.** 20 C. **7.** $3{,}92\cdot10^{-18}$ J. **8.** $2{,}26\cdot10^{6}$ m/s. **9.** 13,88 V. **10.** Увеличился в 3 раза.

ОТВЕТЫ НА ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ ПО ГЛАВЕ VII

5. 0,4 T. **6.** Сила Лоренца не зависит от массы. **7.** 20 V. **8.** 800. **9.** 48 mWb. **10.** 1,8 A/s. **11.** 9. **12.** 56,5 mT. **13.** 1 mJ. **14.** 0,4 mJ.

скачано с сайта www.idum.uz

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Турдиев Н. Ш., Физика, учебник для 6 класса. – Ташкент: Издательство Нисо Полиграф, 2017. – 176 с

2. Улмасова М. Х., Физика, книга 1. Механика и молекулярная физика. Ташкент: Учитель, 2004. - 432 с.

3. Улмасова М. Х., Физика, книга 2. Основы электродинамики, колебания и волны. – Ташкент: Учитель, 2010. - 360 с.

4. Шодиев Д. Ш., Шахмаев Н. М., Физика, учебное пособие для 7 класса. Ташкент: Медицинское издательство имени Абу Али ибн Сина, 2004. - 160 с.

5. Оплачко Т. М., Турсунметов К.А., Физика, часть I. Механика, молекулярная физика, термодинамика. – Т.: Чулпан, 2012. – 208 с.

6. Оплачко Т. М., Турсунметов К.А., Физика, часть II. Электродинамика, оптика, атомная физика. – Т.: Илм зиё, 2009. – 328 с.

7. Исмаилов. М., Юнусов. М. С., Элементарный курс физики. – Ташкент: Учитель, 1990. - 488 с.

8. Ахмаджанов. О. И., Бекжонов. Р. Б., Камолходжаев. Ш. М., Ризаев. Н.А., Физика. - Ташкент: Учитель, 1992. - 368 с.

9. Турсунметов К. А., Узоков А. А., Бурибоев И., Худойберганов А. М. Сборник задач по физике. Ташкент: Учитель, 2003. – 272 с.

10. Рымкевич А. П. Сборник задач по физике. – Ташкент: Учитель, 1990.

скачано с сайта www.idum.uz

O‘quv nashri

FIZIKA

Umumiy o‘rta ta’lim maktablarining
10-sinfi uchun darslik
(Rus tilida)

Перевод с узбекского Дониёр Бабажанов
Редактор Заре Сардарян
Художественный редактор Сарвар Фармонов
Технический редактор Акмал Сулейманов
Художник Зейналабиддин Абдулвахидов
Дизайнер Акбарали Мамасолиев
Корректор Вераника Пак
Верстальщик Рустам Исакулов

Подписано в печать____2022. Формат 60x84 $^{1}/_{8}$.
Гарнитура «Cambria». Кегль 12. Печать офсетная.
Усл.печ.л. 22,32. Уч.изд.л. 12,47.
Тираж_____ Заказ_____

скачано с сайта www.idum.uz

Сведения о состоянии учебника, выданного в аренду

№	Имя и фамилия ученика	Учебный год	Состояние учебника при получении	Подпись классного руководителя	Состояние учебника при сдаче	Подпись классного руководителя
1.						
2.						
3.						
4.						
5.						
6.						

Таблица заполняется классным руководителем при передаче учебника в аренду и возврате в конце учебного года. При заполнении таблицы используются следующие оценочные критерии:

Новый	Состояние учебника при первой сдаче
Хорошее	Обложка цела, не оторвана от основной части книги. все страницы в наличии, не порваны, на страницах нет записей и помарок.
Удовлетворительное	Обложка не смята, слегка испачкана, края стёрты. Удовлетворительно восстановлен пользователем. Вырванные страницы восстановлены, но некоторые страницы исчерчены.
Неудовлетворительное	Обложка испачкана, порвана, корешок оторван от основной части книги или совсем отсутствует. Страницы порваны, некоторых вообще не хватает, имеющиеся исчерчены. Учебник к дальнейшему пользованию не пригоден, восстановить нельзя.