

ФИЗИКА 10

МЕХАНИКА

КИНЕМАТИКА

ДИНАМИКА

ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ В МЕХАНИКЕ

СТАТИКА И ГИДРОДИНАМИКА

МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

ОСНОВЫ ТЕРМОДИНАМИКИ

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

ЗАКОНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В РАЗНЫХ СРЕДАХ

Учебник для учеников 10 класса средних образовательных учреждений и учреждений среднего специального профессионального образования.

*Утверждено Министерством Народного образования
Республики Узбекистана*

1-ое издание

ТАШКЕНТ – «NISO POLIGRAF» – 2017

УДК 53(075.3)

ББК 22.3уа721

Ф 58





Авторы:

- Н.Ш. Турдиев,** – Механика, IV глава. «Статика и гидродинамика», VIII глава. «Законы постоянного тока», IX глава. «Электрический ток в разных средах»;
К.А. Турсунметов, – V глава. «Механические колебания и волны»;
А.Г. Ганиев, – III глава. «Законы сохранения в механике», VI глава. «Термодинамика»;
К.Т. Суяров, – I глава. «Кинематика», VII глава. «Электродинамика»;
Ж.Э. Усаров, – II глава. «Динамика», V глава. «Механические колебания и волны»;
А.К. Авлиякулов – III глава. «Законы сохранения в механике», VI глава. «Термодинамика».

Рецензенты:

- Ш. Усманов** – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Физико-технического института АН РУз;
Б. Нуриллаев – кандидат педагогических наук, доцент, заведующий кафедрой ТГПУ им. Низами;
З. Сангирова – главный методист РЦО;
Б. Саидхужаева – преподаватель физики школы № 5 Паркентского района Ташкентской области, Заслуженный сотрудник Народного образования Республики Узбекистан;
Ф. Наркабилов – преподаватель школы № 303 Сергелийского района г. Ташкента;
З. Тажибаева – преподаватель медицинского колледжа им. П.Ф. Боровского;
Н. Бердирасулов – преподаватель школы № 104 Сергелийского района г. Ташкента;

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ:

-  – понятия физических величин; основные законы;
-  – важные формулы;
- * – темы рекомендованы ученикам для углубленного изучения физики;
-  – практические задания для выполнения учеником;
-  – ответить на поставленные вопросы;

Издано за счет средств Республиканского целевого книжного фонда

ISBN 978-9943-4867-7-5

© Н.Ш. Турдиев и др. 2017
© Издательство «Niso-Poligraf»,
2017

МЕХАНИКА

Тема 1. ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ МЕТОДЫ ФИЗИКИ

В физике существуют разнообразные исследовательские методы изучения процессов и явлений в природе.

Физика считается экспериментальной наукой. Часто эксперимент требует особых условий, приближенных к идеальным, т.е. внешние воздействия не должны оказывать влияние на изучаемый процесс. И благодаря математическим выражениям физических параметров, физикам удается точно показать, как будут проходить процессы в дальнейшем или описать их начало. Не зря великий итальянский физик Галилео Галилей писал: «Чтобы понять «Книгу природы» нужно знать, на каком языке она написана. Этот язык – математика».

На основании наблюдений можно предположить, что для многих явлений существуют определенные закономерности. Такое предположение называется *научной гипотезой*. Для того чтобы проверить гипотезу ученые проводят опыты (эксперименты). Для этого создаются *специальные условия*, приближенные к естественным.

Для формирования гипотезы, проведения экспериментов и для объяснения их результатов строится модель определенного процесса или явления. Под *моделью* какого-либо процесса понимается его уменьшенное, приведенное в порядок, отдельно показывающее его важные особенности состояние, например понятия «материальная точка» и «идеальный газ».

Во время проведения эксперимента невозможно полностью исключить влияние внешнего воздействия. Несмотря на это, по полученным данным возможно предсказать результат эксперимента в идеальных условиях. Такая ситуация называется *научной идеализацией*. Многие явления на первый взгляд кажутся сложными, но все они подчиняются простым законам.

В случае, если гипотеза о ходе физических процессов будет доказана, она превращается в *физический закон*.

Основу механики составляют сформированные великим английским ученым Исааком Ньютоном три закона: закон всемирного тяготения, законы, касающиеся силы упругости и силы трения. Для газовых процессов открыты законы, выражающие взаимосвязь между давлением, объемом и температурой газа. Взаимодействие между заряженными частицами в состоянии покоя описывается законом, открытым французским физиком Шарлем Кулоном.

Комплекс законов, объясняющих разнообразные явления, называется *научной теорией*. Например, законы Ньютона составляют классическую теорию механики. Законы, сформулированные английским физиком Д.К. Максвеллом, являются основой классической теории электромагнетизма.

Научная теория включает в себя наряду с законами также использованные при формировании этих законов физические величины и понятия. Самое главное, все величины, определяемые в физической теории, должны быть измерены на опыте.

Все физические законы и теории должны быть близки к реальности, так как при создании теории всегда используются модели процессов и явлений. Согласно этому, имеются *границы применения* законов и теорий. Например, законы классической механики действительны только для тел,двигающихся со скоростью многократно меньшей скорости света, что доказано на ускорителях элементарных частиц. Классическая механика также не может правильно отразить движение частиц (электронов) с очень маленькой массой.

Созданные новые теории не отменяют прежние, а наоборот, дополняют и уточняют их. Одним из важных требований к новым физическим теориям является *принцип соответствия*. Это означает, что в отдельно взятых условиях новая теория должна быть согласована с прежней теорией и соответствовать ей.



1. Почему все определяемые величины в физической теории должны быть измерены на опыте?
2. В каком случае гипотеза превращается в физический закон?

Глава I. КИНЕМАТИКА

Тема 2. ВИДЫ МЕХАНИЧЕСКОГО ДВИЖЕНИЯ. ПРИНЦИП НЕЗАВИСИМОСТИ ДВИЖЕНИЯ

В 7 классе вы ознакомились с различными видами механического движения. Давайте вспомним их:

1. Прямолинейное равномерное движение. При таком движении траектория движения тела представляет собой прямую линию. Величина и направление скорости не изменяются. Пройденный путь определяется по формуле: $s = v \cdot t$.

2. Прямолинейное неравномерное движение. При таком движении траектория движения тела представляет собой прямую линию. Величина скорости меняется, но направление остается неизменным. Пройденный путь определяется по формуле: $s = v_{\text{ср.}} \cdot t$. Здесь $v_{\text{ср.}}$ – средняя скорость тела.

3. Прямолинейное равноускоренное (замедленное) движение. При таком движении траектория движения тела представляет собой прямую линию. Величина скорости равномерно увеличивается (уменьшается), т.е. за равные промежутки времени скорость увеличивается (уменьшается) на одинаковые величины, но направление не меняется. Пройденный путь определяется по формуле: $s = v_0 \cdot t \pm \frac{at^2}{2}$, знак (+) ставится в случае равноускоренного движения, когда $a > 0$, знак (–) ставится при равнозамедленном движении, т.е. при $a < 0$.

4. Криволинейное равномерное движение. Частным случаем криволинейного движения можно считать равномерное движение по окружности. При таком движении направление скорости постоянно меняется и направляется по касательной к траектории. Основные параметры движения: v – линейная скорость; ω – угловая скорость; T – период вращения; ν – частота вращения; S – длина дуги; s – пройденный путь.

Нужно подчеркнуть, что вышеприведенные примеры описывают случаи, где тело участвует только в одном виде движения. В жизни чаще всего тела участвуют в нескольких видах движения одновременно.

Например, плывущий по реке корабль, идущий по вагону поезда человек, выброшенный из летящего самолета груз и т.д. Плывущий корабль, благодаря силе двигателя движется в одном направлении со скоростью v_1 , а вода течет со скоростью v_2 . Очевидно, что тело участвует сразу в двух видах движения.

Возникает такой вопрос. Зависит ли скорость корабля, переданная силой тяги двигателя, от скорости течения воды в реке? Зависит ли время падения груза, выброшенного из самолета, от скорости самолета?

Опыты показывают, что скорость корабля не зависит от скорости течения воды, время падения груза, выброшенного из самолета, не зависит от скорости самолета!

Из этого вытекает следующий вывод.

Движения, в которых участвует тело, являются независимыми, их скорости (ускорения) не зависят друг от друга. Это называется принципом независимости движения.

Исходя из этого, любое сложное движение можно рассматривать как сумму простых движений. Эти движения не влияют друг на друга. Если одно из них изменяется или прекращается, это не влияет на другое движение. Именно на основе этого принципа мы можем в изучаемом процессе разделить их на отдельные составляющие векторных величин, т.е. этот принцип основан на проекции каждого движения на оси координат. Кроме того, этот принцип основан на получении результирующей скорости путем сложения векторов скоростей. На основе этого для движения тела, участвующего в нескольких движениях, делаем следующие выводы:

$$\begin{aligned}
 \vec{s}_{\text{общ.}} &= \vec{s}_1 + \vec{s}_2 + \vec{s}_3 + \dots + \vec{s}_n, \\
 \vec{v}_{\text{общ.}} &= \vec{v}_1 + \vec{v}_2 + \vec{v}_3 + \dots + \vec{v}_n \\
 \vec{a}_{\text{общ.}} &= \vec{a}_1 + \vec{a}_2 + \vec{a}_3 + \dots + \vec{a}_n
 \end{aligned}
 \tag{1.1}$$

$$\vec{s} = \vec{s}_0 + \vec{v}_{\text{общ.}} t + \frac{a_{\text{общ.}} t^2}{2}.$$

Соответственно проекции этих величин на оси x и y будут следующими:

$$s_x = s_{0x} + v_x t + \frac{a_x t^2}{2}, \quad s_y = s_{0y} + v_y t + \frac{a_y t^2}{2}. \quad (1.2)$$

Образец решения задачи.

Скорость теплохода в воде в состоянии покоя составляет 70 км/час. За какое время он преодолеет расстояние между пристанями, расположенными по течению на расстоянии 36 км друг от друга? Скорость течения реки 2 км/час.

<p>Дано:</p> <p>$s = 36$ км</p> <p>$v_{\text{теп.}} = 70$ км/час</p> <p>$v_{\text{реки}} = 2$ км/час</p> <hr/> <p>Найти:</p> <p>$t = ?$</p>	<p>Формула и решения:</p> <p>$s = v \cdot t; v = v_{\text{теп.}} + v_{\text{реки}};$</p> <p>$s = (v_{\text{теп.}} + v_{\text{реки}}) \cdot t;$</p> <p>Отсюда: $t = \frac{s}{v_{\text{теп.}} + v_{\text{реки}}} = \frac{36}{(70+2)} \frac{\text{км}}{\text{км/час}} = 0,5$ час.</p> <p style="text-align: right;">Ответ: 0,5 час.</p>
---	---



1. В каких случаях вектор скорости разделяется на составляющие?
2. В чем заключается принцип независимости движения?
3. Почему движения не влияют друг на друга, если тело одновременно участвует в нескольких движениях?

Тема 3. ВЕРТИКАЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ ТЕЛ

Если держать в руках какой-либо предмет, а затем отпустить его, то предмет из-за притяжения Земли начнет двигаться прямо к ее поверхности. Такое движение тел называется *вертикальное движение вниз*. С этим движением вы ознакомились на уроках физики в 7 классе. В этой теме мы рассмотрим вертикальное движение вниз с точки зрения принципа независимости движений.

Когда тело двигается вертикально, на него действует одна или несколько сил (сила тяжести, сила сопротивления воздуха, сила Архимеда). В случае движения тел вверх (вертикально) в целях упрощения задачи мы не учитываем *силу сопротивления воздуха* и *силу Архимеда*.

Понаблюдаем за движением какого-либо предмета, подбросив его вверх в вертикальном направлении (рис. 1.1). Если бы тело двигалось вверх только со скоростью v_0 , оно за время t поднялось бы на высоту $h_1 = v_0 \cdot t$. Но под воздействием силы притяжения земли за это время t высота подъема

тела уменьшается на: $h_2=gt^2/2$. В этом случае возможная высота подъема тела равняется: $h=h_1-h_2$, т.е. уравнение движения тела имеет следующий вид:

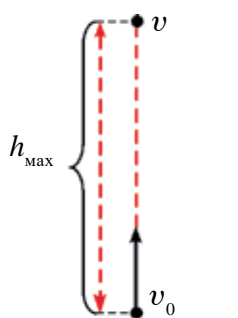


Рис. 1.1.

$$h = v_0 \cdot t - \frac{gt^2}{2} \quad (1.3)$$

Движение тела, брошенного вертикально вверх, является равнозамедленным движением.

Скорость тела через время t определяется с помощью выражения:

$$v = v_0 - gt \quad (1.4)$$

Тело останавливается при достижении самой верхней точки ($v=0$) и начинает вертикальное движение вниз.

Приравняв левую сторону выражения (1.4) нулю, находим выражение для определения времени, необходимого для подъема тела:

$$t_{\text{подъем}} = \frac{v_0}{g} \quad (1.5)$$

Максимальная высота подъема тела определяется выражением:

$$h = \frac{v_0 t_{\text{подъем}}}{2} = \frac{gt_{\text{паден}}^2}{2} = \frac{v_0^2}{2g} \quad (1.6)$$

В условиях, когда сопротивление воздуха ничтожно мало и можно его не учитывать, время подъема брошенного вверх тела будет равно времени падения вниз $t_k = t_p$, т.е. с какой скоростью тело будет брошено вертикально вверх, то с такой же скоростью тело вернется вниз.

Тело, брошенное вертикально вниз, совершает равномерно ускоренное движение. Здесь скорость тела через время t определяется выражением:

$$v = v_0 + gt \quad (1.7)$$

Уравнение движения тела, брошенного вертикально вниз, запишем следующим образом:

$$h = v_0 t_{\text{паден}} + \frac{gt_{\text{подъем}}^2}{2} \quad (1.8)$$

Первым закономерности вертикального движения тел экспериментальным способом начал изучать великий итальянский ученый Г. Галилей. На основе проведенных опытов были обнаружены две закономерности вертикального падения тел. Во-первых, вертикальное падение тела является прямолинейным равноускоренным движением, во-вторых, все тела при свободном падении двигаются с постоянным ускорением.

Если учесть, что свободное падение тел является равноускоренным движением, то все уравнения прямолинейного равноускоренного движения в этом случае также действительны, т.е. можно заменить ускорение a на ускорение свободного падения g , путь s на высоту h (табл. 1).

Из-за того, что свободное падение происходит равноускоренно, а движение вертикально вверх – равнозамедленно, среднюю скорость движения тела можно определить из следующего выражения:

$$v_{\text{ср.}} = \frac{v_0 + v}{2}. \quad (1.9)$$

Образец решения задачи:

Начальная скорость предмета, падающего с крыши здания высотой 20 м, равна 15 м/сек. Чему равняется его скорость в момент столкновения с землей?

<p>Дано:</p> <p>$h = 20 \text{ м}$</p> <p>$v_0 = 15 \frac{\text{м}}{\text{с}}$</p> <p>$g = 10 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$</p> <hr/> <p>Найти:</p> <p>$v - ?$</p>	<p>Формула:</p> $v = \sqrt{v_0^2 + 2gh}$	<p>Решение:</p> $v = \sqrt{(15^2 + 2 \cdot 10 \cdot 20) \frac{\text{м}^2}{\text{с}^2}} = 25 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ <p style="text-align: right;"><i>Ответ:</i> $25 \frac{\text{м}}{\text{с}}$</p>
---	--	--

Таблица 1

Уравнения равноускоренного движения	Уравнения движения при свободном падении
$v = v_0 + at$; если $v_0 = 0$, то $v = at$	$v = v_0 + gt$; если $v_0 = 0$, то $v = gt$
$s = v_0 t + \frac{at^2}{2}$; если $v_0 = 0$, то $s = \frac{at^2}{2}$	$h = v_0 t + \frac{gt^2}{2}$; если $v_0 = 0$, то $h = \frac{gt^2}{2}$

$s = \frac{v^2 - v_0^2}{2a}$	$h = \frac{v^2 - v_0^2}{2g}$
Если $v_0 = 0$, то $v = \sqrt{2as}$	Если $v_0 = 0$, то $v = \sqrt{2gh}$



1. Назовите вид движения тела, брошенного вертикально вверх?
2. Почему в уравнении движения тела, брошенного вертикально вверх, ускорение имеет знак минус?
3. Меняется ли ускорение тел при подъеме вверх?



1. Докажите равенство времени подъема и падения для тела, брошенного вертикально вверх?
2. Докажите, что тело, брошенное вертикально вверх с какой-либо скоростью, возвращается обратно с такой же скоростью.

Тема 4. НЕРАВНОМЕРНОЕ ДВИЖЕНИЕ ПО ОКРУЖНОСТИ. УГЛОВОЕ УСКОРЕНИЕ. ТАНГЕНЦИАЛЬНОЕ УСКОРЕНИЕ

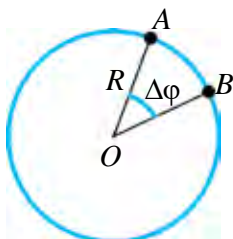


Рис. 1.2.

Вы в 7 классе ознакомились с равномерным движением по окружности. В данной теме мы рассмотрим неравномерное движение по окружности. Вспомним физические величины, которые описывают равномерное движение по окружности (рис. 1.2).

Величина, численно равная пути, пройденному за единицу времени равномерно двигающейся по дуге окружности материальной точкой, называется линейной скоростью и определяется следующим выражением:

$$v = \frac{\check{S}_{AB}}{t}. \quad (1.10).$$

2. Отношение угла поворота радиуса окружности при равномерном движении по окружности ко времени поворота называется угловой скоростью:

$$\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}. \quad (1.11)$$

Угловая скорость, также как и линейная скорость, считается векторной величиной. Ее направление определяется по правилу правого винта. То есть, если головку винта вращать по направлению вращения тела, то поступательное движение его укажет направление вектора углового перемещения, или угловой скорости (рис. 1.3).

В большинстве случаев тела, совершающие вращательные движения, меняют скорость вращения. Например, в начале движения автомобиля до достижения им определенной скорости или в момент торможения до полной остановки, колеса автомобиля совершают вращательные движения с разной скоростью.

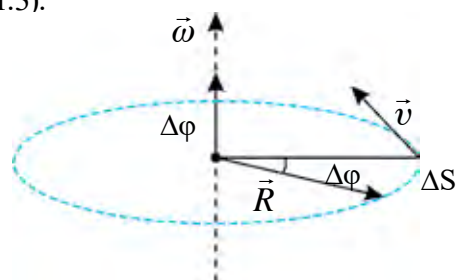


Рис. 1.3.

Движение, при котором угловая скорость предмета, совершающего вращательное движение, изменяется по времени называется переменным вращательным движением.

Среди переменных вращательных движений встречаются движения, в которых угловая скорость за любые равные промежутки времени меняется на равные значения. Например, колеса автобуса, который приближается к остановке или отъезжает от нее, совершают равнопеременное вращательное движение. В таких движениях ритм изменения угловой скорости описывается физической величиной, называемой угловым ускорением.

Величина, измеряемая отношением изменения угловой скорости ко времени, за которое произошло это изменение, называется угловым ускорением.

$$\varepsilon = \frac{\Delta\omega}{\Delta t}. \quad (1.12)$$

Угловое ускорение при равнопеременном движении с течением времени не меняется, так как угловая скорость такого движения тоже меняется за равные промежутки времени на равные значения. Если начальная угловая скорость движущейся материальной точки равна ω_0 , угловая скорость через промежуток времени Δt равна ω , то изменение угловой скорости будет: $\Delta\omega = \omega - \omega_0$. Тогда уравнение (1.12) приобретает вид:

$$\varepsilon = \frac{\omega - \omega_0}{\Delta t} \quad (1.13)$$

Исходя из этого, единица измерения углового ускорения будет равна $[\varepsilon] = \frac{\text{rad}}{c^2}$. Из выражения (1.13) можно вывести формулу для определения угловой скорости в любой момент времени:

$$\omega = \omega_0 + \varepsilon \Delta t. \quad (1.14)$$

Если угловая скорость в ходе движения растет равномерно, вращательное движение будет равноускоренным ($\varepsilon > 0$) (рис. 1.4 а). Если угловая скорость вращательного движения в ходе вращения равномерно уменьшается, такое вращательное движение называется равномерно замедленным ($\varepsilon < 0$) (рис. 1.4 б).

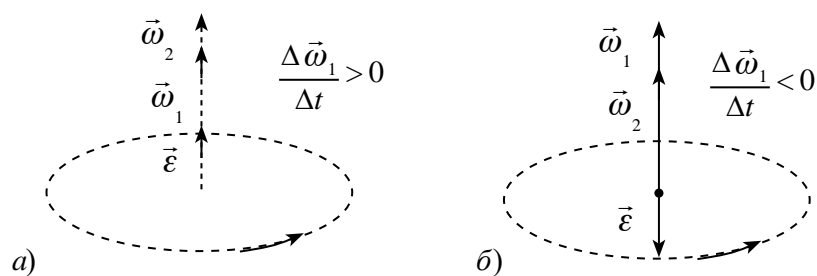


Рис. 1.4.

Из-за того, что при вращательном движении угловая скорость является векторной величиной, угловое ускорение тоже считается векторной величиной. Так как, в формуле (1.13) Δt является скалярной величиной. В случае $\omega > \omega_0$, вектор $\varepsilon > 0$ и угловое ускорение $\vec{\varepsilon}$ совпадает с направлением угловой скорости, а в случае $\omega < \omega_0$ будет, $\varepsilon < 0$ и вектор $\vec{\varepsilon}$ противоположен вектору $\vec{\omega}$.

В уравнении равнопеременного прямолинейного движения достаточно заменить пройденный путь s на угол поворота φ , скорость v на угловую скорость ω , ускорение a на угловое ускорение ε чтобы получить уравнение равномерно изменяющегося вращательного движения. Сопоставление этих уравнений для данных видов движения приводится в следующей таблице:

Прямолинейное равнопеременное движение ($a = \text{const}$)

$$s = v_{\text{ср.}} \cdot t$$

$$v_{\text{ср.}} = \frac{v_0 + v}{2}$$

$$v = v_0 + a \cdot t$$

$$s = v_0 \cdot t + \frac{a \cdot t^2}{2}$$

$$v^2 - v_0^2 = 2a \cdot s$$

если $v_0 = 0$, то

$$v = a \cdot t \text{ и } v = \sqrt{2a \cdot s}$$

если $a < 0$, то

$$v = v_0 - a \cdot t$$

$$s = v_0 \cdot t - \frac{a \cdot t^2}{2}$$

$$v_0^2 - v^2 = 2a \cdot s$$

Равнопеременное вращательное движение ($\varepsilon = \text{const}$)

$$\varphi = \omega_{\text{ср.}} \cdot t$$

$$\omega_{\text{ср.}} = \frac{\omega_0 + \omega}{2}$$

$$\omega = \omega_0 + \varepsilon \cdot t$$

$$\varphi = \omega_0 \cdot t + \frac{\varepsilon \cdot t^2}{2}$$

$$\omega^2 - \omega_0^2 = 2\varepsilon \cdot \varphi$$

если $\omega_0 = 0$, то

$$\omega = \varepsilon \cdot t \text{ и } \omega = \sqrt{2\varepsilon \cdot \varphi}$$

если $\varepsilon < 0$, то

$$\omega = \omega_0 - \varepsilon \cdot t$$

$$\varphi = \omega_0 \cdot t - \frac{\varepsilon \cdot t^2}{2}$$

$$\omega_0^2 - \omega^2 = 2\varepsilon \cdot \varphi$$

При вращательном движении встречаются случаи, когда меняется количественная величина линейной скорости материальной точки. В таких случаях в связи с изменением линейной скорости материальной точки возникает ускорение. Из-за того, что это ускорение появилось в результате изменения количественных величин скорости, его направление совпадает с направлением скорости. Поэтому оно называется касательным, т.е. тангенциальным ускорением и его можно выразить формулой:

$$\vec{a}_\tau = \frac{\Delta \vec{v}}{t}. \quad (1.15)$$

Таким образом, если меняется линейная скорость материальной точки, совершающей вращательное движение, ее общее ускорение можно определить по формуле:

$$\vec{a} = \vec{a}_\tau + \vec{a}_n \text{ или } a = \sqrt{a_\tau^2 + a_n^2} \quad (1.16)$$

здесь $a_\tau = \varepsilon R$.



1. Какую физическую величину называют угловой скоростью равнопеременного движения?

2. Как определяется направление угловой скорости?
3. Существует ли криволинейное движение без нормального или тангенциального ускорения?
4. Совершая равнозамедленное движение, колесо в течении 1 минуты уменьшило частоту вращения с 300 об/мин до 180 об/мин. Найдите угловое ускорение колеса и количество полных оборотов за этот период.

Тема 5. ВЗАИМНАЯ ПЕРЕДАЧА ВРАЩАТЕЛЬНОГО И ПОСТУПАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ

Если наблюдать за движением транспортных средств в повседневной жизни, то можно заметить, что двигаются они с различной скоростью, несмотря на то, что их двигатели работают одинаково. Автомобили на хороших дорогах могут преодолевать подъем на больших скоростях, а по пересеченной местности двигаются медленно. Также при работе промышленного оборудования можно заметить, что различные части станков вращаются с различными скоростями. Повседневные используемые в быту механизмы преобразуют вращательное движение в поступательное, например, как в швейных машинках (рис. 1.5).



Рис. 1.5.

В подобных механизмах используют фрикционные, ленточные и зубчатые формы передачи вращательного движения, и вы ознакомитесь с ними в данной теме.

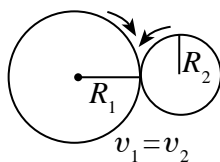


Рис. 1.6.

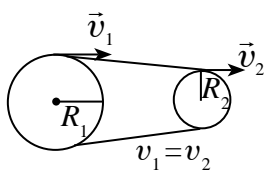


Рис. 1.7.

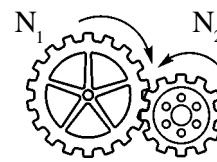


Рис. 1.8.

Передача движения фрикционным способом. Для того чтобы передать вращательное движение фрикционным способом, два колеса с разными диаметрами с силой прижимают друг к другу. Если одно из них вращается по часовой стрелке, то второе приходит в движение под

действием силы трения и вращается в противоположном направлении, т.е. против часовой стрелки (рис. 1.6).

Фрикционной передачей пользуются в случаях, когда передаваемая мощность не очень большая. В этом случае колеса относительно друг друга не скользят, по этому модули линейной скорости окружности колес численно взаимно равны: $v_1 = v_2$ или

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{R_2}{R_1}. \quad (1.17)$$

Ременная передача движения. Во время передачи вращательного движения ременным путем два колеса соединяются друг с другом туго натянутым ремнем (рис. 1.7). В этом случае движение передается за счет трения. Шкив (колесо), передающий движение, называется ведущим, а шкив (колесо), принимающий движение – ведомым шкивом. При ременной передаче абсолютные значения линейных скоростей колес также равны между собой: $v_1 = v_2$.

Угловые скорости в зависимости от радиусов колес находятся между собой в следующем соотношении:

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{R_2}{R_1}. \quad (1.18)$$

Передача движения зубчатыми колесами. Способ передачи вращательного движения с помощью двух зубчатых колес разного диаметра, соединенных между собой, называется зубчатой передачей движения (рис. 1.8). Пусть первое колесо с N_1 зубцами вращается v_1 раз в секунду, связанное с ним второе колесо с N_2 зубцами вращается v_2 раз в секунду. В точке соприкосновения за единицу времени проходит $N_1 \cdot v_1$ зубцов первого колеса и $N_2 \cdot v_2$ зубцов второго колеса. Количество зубцов, проходящих точку соприкосновения двух колес за единицу времени, равно между собой, т.е.:

$$N_1 \cdot v_1 = N_2 \cdot v_2. \quad (1.19)$$

Из этого следует, что частоты вращения сцепленных колес обратно пропорциональны числу зубцов:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{v_2}{v_1}. \quad (1.20)$$

На рис. 1.9 приведены способы связи ведущего и ведомого вала с помощью ремня для движения в одном и в противоположном направлениях.



Рис. 1.9.



1. Какие преимущества и недостатки имеет фрикционная передача вращательного движения?
2. Приведите примеры механизмов, в которых используется ременная передача вращательного движения.
3. Как осуществляется зубчатая передача вращательного движения?

Тема 6. ДВИЖЕНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНО БРОШЕННОГО ТЕЛА

Рассмотрим движение шара, движущегося прямолинейно по поверхности стола с высотой h . Первоначально шар по инерции будет двигаться прямолинейно до края стола. При падении с края стола до пола шар будет участвовать в двух движениях. То есть мы увидим продолжение движения в изначальном направлении, а также вертикальное падение вниз. Такое движение шара является примером движения вертикально брошенного тела. Для описания такого движения выберем систему координат XOY и свяжем его с точкой падения (рис. 1.10).

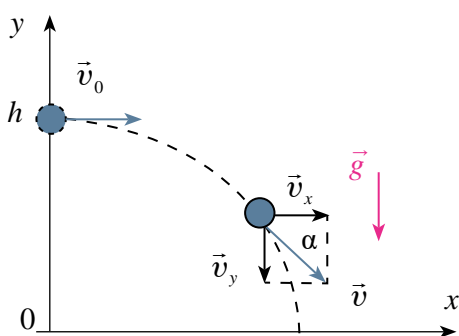


Рис. 1.10.

При достаточно малом сопротивлении воздуха, которым можно пренебречь, тело будет двигаться в горизонтальном направлении равномерно со скоростью v_0 . Поэтому перемещение в горизонтальном направлении в любой момент времени t , или длина полета, определяется следующей формулой:

$$x = s = v_0 \cdot t. \quad (1.21)$$

Проекции скорости тела на оси x и y определяются следующими соотношениями:

$$v_x = v_0, \quad v_y = -g \cdot t. \quad (1.22)$$

В вертикальном же направлении, двигаясь равноускоренно без начальной скорости, тело будет свободно падать с высоты h . Следовательно, положение тела в вертикальном направлении после произвольного времени t будет определяться формулой:

$$y = h - \frac{gt^2}{2}. \quad (1.23)$$

Из соотношений (1.21) и (1.22) уравнение траектории движения горизонтально брошенного тела на плоскости XOY будет иметь следующий вид:

$$y = h - \frac{g}{2v_0^2} x^2. \quad (1.24)$$

Выражение (1.24) является уравнением параболы. Значит, горизонтально брошенное тело будет двигаться по параболической линии. Время полета тела, брошенного горизонтально с высоты h , определяется выражением:

$$t = \sqrt{\frac{2h}{g}} \quad (1.25)$$

В этом случае формула для расчета длины полета тела будет иметь вид:

$$s = v_0 \sqrt{\frac{2h}{g}} \quad (1.26)$$

Горизонтально брошенное тело, одновременно двигаясь в горизонтальном направлении равномерно и в вертикальном направлении равноускоренно, свободно падает. К концу движения (после истечения времени t) скорости в горизонтальном и вертикальном направлении будут $v_x = v_0$ и $v_y = g \cdot t$ соответственно. Таким образом, скорость тела при падении на землю определяется выражением:

$$v^2 = v_x^2 + v_y^2$$

или

$$v = \sqrt{v_0^2 + 2gh}. \quad (1.27)$$

Перемещение и траектория тела при криволинейном движении неравны между собой. Модуль вектора и направление движения горизонтально брошенного тела на протяжении движения меняются непрерывно.

Образец решения задачи.

Тело брошено горизонтально на высоте 35 м со скоростью 30 м/с. Найти скорость тела при падении на землю.

<p>Дано:</p> <p>$h = 35 \text{ м}$</p> <p>$v_0 = 30 \text{ м/с}$</p> <p>$g \approx 10 \text{ м/с}^2$</p> <hr/> <p>Найти:</p> <p>$v = ?$</p>	<p>Формула:</p> $v = \sqrt{v_0^2 + 2gh}$	<p>Решение:</p> $v = \sqrt{(30 \text{ м/с})^2 + 2 \cdot 10 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \cdot 35 \text{ м}} = 40 \text{ м/с.}$ <p style="text-align: right;">Ответ: 40 м/с.</p>
---	--	--



1. В каких движениях участвует горизонтально брошенное тело?
2. Какой линией описывается траектория горизонтально брошенного тела?
3. Какая из горизонтальной и вертикальной составляющих скорости горизонтально брошенного тела не меняется на протяжении движения?
4. Приведите дополнительные примеры к теме из повседневной жизни.
5. Длина полета и высота броска тела, брошенного горизонтально со скоростью 10 м/с, равны. С какой высоты брошено тело?

Тема 7. ДВИЖЕНИЕ ТЕЛА, БРОШЕННОГО ПОД УГЛОМ К ГОРИЗОНТУ

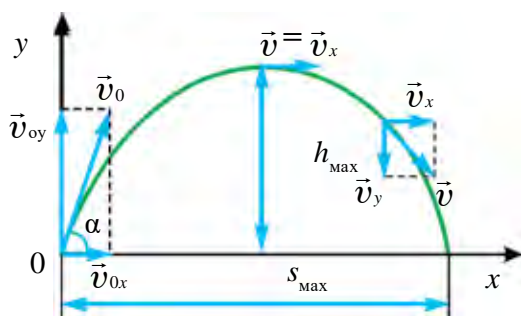


Рис. 1.11.

Если рассмотреть движение тела, брошенного под углом относительно горизонта, можно увидеть, что тело отдаляется горизонтально от точки броска и одновременно поднимается в вертикальном направлении. Значит, тело, брошенное под углом к горизонту, участвует в двух

(горизонтальном и вертикальном) видах движения. В горизонтальном направлении тело движется равномерно. В вертикальном направлении до точки максимальной высоты тело будет двигаться равнозамедленно, затем вниз будет двигаться равноускоренно (рис. 1.11).

Траектория движения тела, брошенного под углом к горизонту, имеет вид параболы. Учитывая, что в процессе полета тело одновременно движется в горизонтальном и вертикальном направлениях, разделим начальную скорость v_0 на горизонтальную (v_{0x}) и вертикальную (v_{0y}) составляющие:

$$\begin{cases} v_{0x} = v_0 \cdot \cos \alpha, \\ v_{0y} = v_0 \cdot \sin \alpha. \end{cases} \quad (1.28)$$

Для упрощения расчетов пренебрежем сопротивлением воздуха. В произвольный момент времени t перемещение тела в горизонтальном направлении находим из следующего уравнения:

$$s_x = v_{0x} \cdot t = v_0 \cdot t \cdot \cos \alpha \quad (1.29)$$

В произвольный момент времени t скорость тела в горизонтальном и вертикальном направлениях можно найти из следующих уравнений:

$$\begin{aligned} v_x &= v_{0x} = v_0 \cdot \cos \alpha, \\ v_y &= v_{0y} - gt = v_0 \cdot \sin \alpha - gt. \end{aligned} \quad (1.30)$$

На протяжении движения тела, брошенного под углом к горизонту, горизонтальная составляющая скорости не меняется, вертикальная составляющая при подъеме является равнозамедленной и на максимальной высоте подъема равняется нулю. Значит, тело, брошенное под углом к горизонту, имеет минимальную скорость в высшей точке траектории:

$$v_{\min} = v_0 \cdot \cos \alpha. \quad (1.31)$$

Затем из этой точки тело движется как тело, брошенное горизонтально со скоростью v_{0x} .

Из соотношения $v_y = 0$ или $v_0 \sin \alpha - gt = 0$ на максимальной высоте траектории находим время подъема:

$$t_{\text{под}} = \frac{v_0 \cdot \sin \alpha}{g}. \quad (1.32)$$

Максимальная высота подъема тела определяется следующим соотношением:

$$h_{\max} = \frac{v_0^2 \cdot \sin^2 \alpha}{2g}. \quad (1.33)$$

Время движения тела вниз (падение) равно времени подъема, т.е. $t_{\text{под}} = t_{\text{пад}}$. Отсюда, общее время полета:

$$t = \frac{2v_0 \cdot \sin \alpha}{g}. \quad (1.34)$$

Тело, брошенное под углом к горизонту, в горизонтальном направлении движется равномерно. По этой причине длина полета тела зависит только от горизонтальной составляющей скорости. Для определения дальности полета подставим выражение t времени полета в выражение $s_x = v_0 \cdot t = v_{0x} \cdot t \cdot \cos \alpha$ и получим:

$$s_x = v_{0x} \cdot t = v_0 \cdot \cos \alpha \cdot \frac{2v_0 \cdot \sin \alpha}{g}$$

или

$$s = \frac{v_0^2 \cdot \sin 2\alpha}{g} \quad (1.35)$$

Из этого выражения видно, что длина полета тела, брошенного под углом к горизонту, зависит от угла броска. На рис. 1.12 приведена зависимость длины полета и высоты подъема от угла броска. Из рисунка видно, что с увеличением угла броска увеличивается высота подъема.

Длина полета тела вначале растет с ростом угла броска и достигает максимального значения при 45° . Затем с дальнейшим увеличением угла броска длина полета уменьшается.

Выведем уравнение траектории движения тела, брошенного под углом к горизонту. Для этого в уравнение:

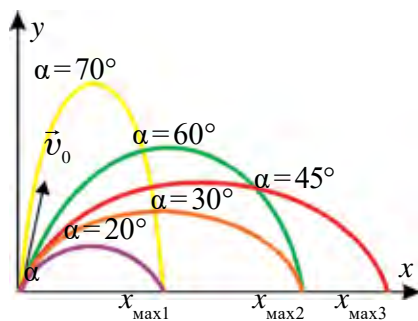


Рис. 1.12.

$$y = v_{0y} t - \frac{gt^2}{2}.$$

подставляем выражение для времени полета

$$t = \frac{x}{v_0 \cos \alpha}$$

из уравнения (1.29) и получаем

уравнение траектории в следующем виде:

$$y = x \cdot \operatorname{tg} \alpha - \frac{g \cdot x^2}{2v_0^2 \cdot \cos^2 \alpha}. \quad (1.36)$$

Таким образом, тело, брошенное под углом к горизонту, движется по параболе, проходящей через начало координат при $x=0$, $y=0$. В этом уравнении коэффициент перед x^2 отрицательный, значит, ветви параболы направлены вниз.

В реальных условиях сопротивление воздуха сильно влияет на дальность полета. К примеру, снаряд, пущенный со скоростью 100 км/ч, в вакууме пролетает расстояние в 1000 м, а в воздухе 700 м. Из экспериментов следует, что при угле броска 30-40° тело пролетает наибольшее расстояние.

Образец решения задачи.

Мяч брошен со скоростью 10 м/с под углом 30° к горизонту. На какую высоту поднимется мяч?

<p>Дано:</p> <p>$v_0 = 10$ м/с</p> <p>$\alpha = 30^\circ$</p> <p>$g = 9,81$ м/с²</p> <hr/> <p>Найти:</p> <p>$h - ?$</p>	<p>Формула:</p> $h_{\max} = \frac{v_0^2 \cdot \sin^2 \alpha}{2g}$	<p>Решение:</p> $h_{\max} = \frac{\left(10 \frac{\text{м}}{\text{с}}\right)^2 \cdot 1/4}{2 \cdot 9,81 \text{ м/с}^2} = 1,27 \text{ м.}$ <p style="text-align: right;">Ответ: 1,27 м.</p>
--	---	--



1. Должен ли баскетболист учитывать свой рост при броске мяча в корзину?
2. По какой траектории будет двигаться тело, брошенное под углом к горизонту, если учитывать сопротивление воздуха?
3. Под каким углом должен пустить стрелу спортсмен на соревнованиях по стрельбе из лука?



Во дворе или в ванной комнате подключите к водопроводному крану шланг, попробуйте лить воду под разными углами. Проанализируйте результат.

Тема 8. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА: ИЗУЧЕНИЕ ДВИЖЕНИЯ ТЕЛА, БРОШЕННОГО ПОД УГЛОМ К ГОРИЗОНТУ

Цель работы: Проверить зависимость длины полета тела от угла броска.

Необходимые приборы и оборудование: Баллистический пистолет, металлический шарик, мерная лента, 2–3 листа белой и копировальной бумаги.

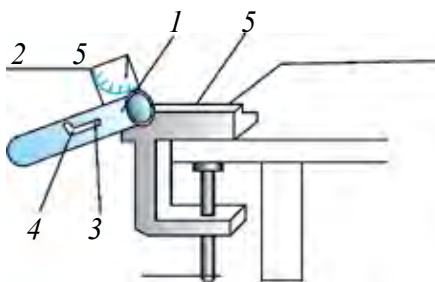


Рис. 1.13.

Порядок выполнения работ.

1. Баллистический пистолет устанавливается на край лабораторного стола (рис. 1.13).
2. Баллистический пистолет крепится под углом 30° к держателю и фиксируется (угол наклона определяется при помощи транспортира).
3. Держатель оттягивается назад и крепится за крючок ствола.
4. Металлический шар устанавливается в ствол.
5. Держатель спускается с крючка и определяется место падения шара.
6. Эксперимент повторяется вышеуказанным способом три раза.
7. Баллистический пистолет устанавливается под углом 45° и эксперимент повторяется.
8. Полученные результаты записываются в следующую таблицу:

Угол выстрела	Эксперимент	l , длина полета, (м)	$l_{\text{ср.}}$ (м)	Δl , (м)	$\Delta l_{\text{ср.}}$ (м)
30°	Эксперимент 1				
	Эксперимент 2				
	Эксперимент 3				
45°	Эксперимент 1				
	Эксперимент 2				
	Эксперимент 3				



1. Какова траектория движения тела, брошенного под углом к горизонту?
2. От каких параметров зависит длина полета тела, брошенного под углом к горизонту?
3. Под каким углом к горизонту и с какой скоростью будет падать тело, брошенное под углом к горизонту с начальной скоростью v_0 ?
4. Проанализируйте зависимость длины и времени полета от угла броска на основании экспериментальных данных.

Упражнение 1

1. Моторная лодка по реке до точки назначения добирается за 1,8 часа, обратно плывет 2,4 часа. За какое время до точки назначения доберется плот? (Ответ: 14,4 часа).

2. Эскалатор в метро поднимает человека наверх за 30 секунд. Если человек движется вместе с эскалатором, то поднимается за 10 секунд. За сколько времени поднимется человек по неподвижному эскалатору? (Ответ: 15 сек.).

3. Тело свободно падает с высоты 80 м. Определите его перемещение за последнюю секунду? Рассчитайте среднюю скорость за время движения. Считать начальную скорость тела равной нулю. (Ответ: 35 м, 20 м/с).

4. Если вертикально брошенное тело прошло последнюю $\frac{1}{4}$ часть пути за 3 секунды, каково общее время подъема? Какова начальная скорость тела? (Ответ: 6 сек., 60 м/с).

5. Если свободно падающее тело с нулевой начальной скоростью за последнюю секунду проходит 75 м, с какой высоты оно падает? Какова скорость падения тела к концу движения? (Ответ: 320 м, 80 м/с).

6. Из одной точки с интервалом в 1 секунду брошены вертикально вверх два шара с начальной скоростью 20 м/с. Через какое время после первого броска оба шара встретятся? (Ответ: 2,5 сек.).

7. При вращении маховика скорость точек на ободке 6 м/с, скорость точек, расположенных ближе к оси на 1,5 см, равна 5,5 м/с. Чему равен радиус маховика? (Ответ: 18 см).

8. Механическое движение от колеса I к колесу II передается с помощью ремня. Если угловая скорость колеса II равна 100 лс^{-1} , и радиусы колес соответственно 30 и 10 см, сколько оборотов в минуту совершает колесо I? (Ответ: 300 раз).

9*. Магнитофон сворачивает ленту со скоростью 4 м/с за 40 секунд. Если начальный радиус мотка 2 см, конечный радиус 6 см, найти толщину ленты. (Ответ: 0,063 мм).

10. С какой начальной скоростью нужно горизонтально бросить тело с высоты $h/3$, чтобы оно упало в ту же самую точку, в которую оно упадет, если бросить его с высоты h с начальной скоростью v_0 ? (Ответ: $v = \sqrt{3} v_0$).

Тестовые вопросы по итогам главы I

1. Моторная лодка относительно берега движется по течению со скоростью 6 м/с, а против течения движется со скоростью 4 м/с. Чему равна скорость течения реки (м/с)?
A) 0,5; B) 1; C) 2,5; D) 5.
2. Тело брошено вертикально вниз со скоростью 15 м/с. Какую скорость наберет тело через 2 секунды (м/с)?
A) 25; B) 35; C) 30; D) 45.
3. С какой скоростью надо бросить тело вертикально вверх, чтобы через 6 секунд оно упало обратно на это место?
A) 20; B) 35; C) 30; D) 40.
4. Скорость тела, брошенного вертикально вверх, через 2 секунды уменьшилось в два раза. С какой скоростью было брошено тело?
A) 30; B) 40; C) 50; D) 60.
5. Два металлических шарика массой 100 гр и 150 гр с одинаковой скоростью брошены вертикально вверх. Какой шарик поднимется выше? Сопротивлением воздуха пренебречь.
A) шарик с меньшей массой;
B) шарик с большей массой;
C) два шарика поднимется на одинаковую высоту;
D) данных не достаточно.
6. Круговое движение передается колесом с 50 зубьями колесу с 150 зубьями. Если первое колесо совершает один оборот за 2 сек., чему равен период вращения второго колеса?
A) 3 с; B) 7,5 с; C) 5 с; D) 6 с.

7. **Какая из перечисленных величин не изменяется при криволинейном равномерном движении?**
 А) модуль мгновенной скорости; В) модуль ускорения;
 С) модуль средней скорости; Д) вектор ускорения.
8. **Каково направление вектора ускорения при криволинейном равномерном движении?**
 А) к центру по радиусу кривизны траектории;
 В) по касательной к траектории движения;
 С) по траектории движения;
 Д) по радиусу кривизны траектории наружу от центра.
9. **С башни высотой 125 м тело брошено со скоростью 30 м/с в горизонтальном направлении. Определите длину полета тела.**
 А) 300 м; В) 120 м; С) 240 м; Д) 150 м.
10. **Тело брошено под углом 30° к горизонту со скоростью 20 м/с. Определите горизонтальную и вертикальную составляющие вектора начальной скорости (м/с).**
 А) 10 и 14,1; В) 17,3 и 10; С) 14,1 и 10; Д) 20 и 10.

**Основные понятия, правила и законы,
изученные в главе I**

Научное наблюдение	Метод научного исследования системный, активный, направленный на цель.
Гипотеза	Предположение о каком-либо процессе, явлении.
Опыт (эксперимент)	Проводится для проверки гипотезы в специальных условиях.
Модель	Упрощенная версия физического процесса, сохраняющая его главные черты.
Научная идеализация	Предсказание получаемого результата в идеальных условиях по ранее полученным результатам.
Научная теория	Набор законов, объясняющий широкую область явлений.

Принцип соответствия	В определенных рамках соответствие новой и старой теорий.
Криволинейное равномерное движение	Движение, траектория которого представляет собой кривую линию, величина скорости не меняется, а направление изменяется по касательной к траектории.
Принцип независимости или суперпозиция движения	Движения, в которых участвует тело, независимы друг от друга, и скорости (ускорение) их движения не зависят друг от друга.
Вертикальное движение вверх	Движение, противоположное силе притяжения Земли. Уравнение движения: $h = v_0 \cdot t - \frac{gt^2}{2}.$
Вертикальное движение вниз	Движение в направлении силы притяжения Земли. Уравнение движения: $h = v_0 \cdot t + \frac{gt^2}{2}.$
Переменное вращательное движение	Вращательное движение, при котором с течением времени меняется угловая скорость.
Угловое ускорение	Величина, определяемая отношением изменения угловой скорости ко времени этого изменения $\varepsilon = \frac{\Delta\omega}{\Delta t}.$
Формула определения угловой скорости в произвольный момент времени при вращательном равнопеременном движении	$\omega = \omega_0 + \varepsilon\Delta t.$
Тангенциальное ускорение	Ускорение, получаемое в связи с изменением величины скорости $\vec{a}_\tau = \frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t}.$

Полное ускорение при криволинейном движении	$\vec{a} = \vec{a}_\tau + \vec{a}_n, \quad a = \sqrt{a_\tau^2 + a_n^2}.$
Передача движения фрикционным способом	Движение, передаваемое с помощью действующих поверхностей двух колес с разными радиусами.
Ременная передача движения	Движение передается от одного колеса к другому через туго натянутый ремень.
Передача движения через зубчатые колеса	Передача вращательного движения путем объединения двух зубчатых колес с разными диаметрами.
Дальность полета и скорость при падении горизонтально брошенного тела.	$s = v_0 \sqrt{\frac{2h}{g}}; \quad v = \sqrt{v_0^2 + 2gh}.$
Минимальная скорость тела, брошенного под углом к горизонту	$v_{\min} = v_0 \cdot \cos \alpha.$
Высота подъема тела, брошенного под углом к горизонту	$h_{\max} = \frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{2g}.$
Время полета тела, брошенного под углом к горизонту	$t = \frac{2v_0 \sin \alpha}{g}.$
Дальность полета тела, брошенного под углом к горизонту	$s = \frac{v_0^2 \cdot \sin 2\alpha}{g}.$
Уравнение траектории движения тела, брошенного горизонтально	$y = h - \frac{g}{2v_0^2} x^2.$
Уравнение траектории движения тела, брошенного под углом к горизонту	$y = x \cdot \operatorname{tg} \alpha - \frac{g \cdot x^2}{2v_0^2 \cdot \cos^2 \alpha}.$

Глава II. ДИНАМИКА

Тема 9. ЗАКОНЫ ДИНАМИКИ

Движение объектов окружающей среды вокруг нас подчиняется законам механики.

Впервые детально изучать причины изменения движения тела с помощью экспериментов начал Галилео Галилей (конец XVI века – начало XVII века). Он писал о причине изменения движения тела следующее.

Если на тело не воздействуют какие-либо тела, то тело сохраняет свое положение покоя или прямолинейное движение относительно земли.

Закон, установленный Галилеем, был первым шагом в открытии основных законов механики.

Впоследствии для открытия основных законов динамики Ньютоном были проведены простые опыты. Для их проведения не потребовалось никакого сложного оборудования. Самые большие трудности заключались в том, чтобы выделить самое важное из общего потока различных движений тел.

Динамика происходит от греческого слова «*dynamis*», что означает «сила». И когда мы видим, что какое-то тело движется, то мы можем наблюдать другие тела, которые на него действуют. Другое тело может притягивать, отталкивать или действовать на тела с большого расстояния (например, действие магнита на стальной шар). Если отпустить тело, поднятое на определенную высоту над землей, оно упадет вниз. Во всех этих экспериментах **изменение скорости тела (то есть ускорение) всегда возникает от воздействия другого тела.** Это выражение является наиболее важным заключением Ньютоновской механики.

Процесс взаимного действия тел друг на друга называется **взаимодействием**. То есть любое действие создает противодействие.

Но к такому заключению пришли не сразу. Великий мыслитель Аристотель пытался выяснить причину изменения движения тел. Он писал: «Если на тело не будет действовать толкающая сила, движущееся тело остановится». Аристотель считал, что состояние покоя относительно Земли это естественное состояние тела.

В те времена Земля считалась центром Вселенной и этим объясняли, что тело возвращается к своему естественному состоянию покоя, если не возникнет важной причины. Действительно, если закончится бензин в автомобиле, движущемся по ровной асфальтированной дороге, двигатель выключится. Автомобиль еще будет двигаться некоторое время и остановится. Такое же заключение можно применить к велосипеду и лодке на озере.

На основе наблюдений и выводов был сформулирован первый закон динамики. Он выражается следующим образом:

Существуют такие системы, называемые инерциальными системами, в которых тело будет находиться в покое или продолжит прямолинейное равномерное движение, если на него не будет оказано внешнее воздействие.

Этот закон, с одной стороны, объясняет понятие «инерциальная система отсчета», а с другой – позволяет проверить, существуют ли такие системы. Первый закон механики ставит систему инерции на особое место.

Каждая точка вращающегося твердого тела движется с ускорением. Ускорение любой части происходит под влиянием других частей тела. Иначе говоря, части, образующие твердое тело, не могут быть «свободными телами» и к ним не может быть применен первый закон Ньютона.

Таким образом, мы узнали, что причиной выхода тела из состояния покоя или прямолинейного равномерного движения является воздействие других тел. Взаимодействие тел характеризуется силой.

Согласно Ньютону, в механике количественная величина, которая является причиной получения ускорения в результате взаимодействия тел, называется силой.

Это качественное определение понятия силы. В механике этим определением вводятся два утверждения:

- 1) ускорение тел происходит в результате действия сил;
- 2) сила, дающая ускорение, возникает в результате действия других тел.

Понятие «сила» относится к двум телам. Сила является векторной величиной и имеет направление. Чтобы количественно определить силу, нужно ее измерить. Для этого она сравнивается с другой эталонной силой.

Если одновременное воздействие сил на тело не изменяет значение его скорости (т.е. не придает ему ускорения), то они равны по модулям и направлены противоположно.

Эксперименты показали, что ускорение, полученное телом, зависит не только от приложенной к нему силы, но и от свойства самого тела. Значит, необходимо уточнить это свойство. В механике оно характеризуется **массой тела**.

Вам известно из 7-го класса, что отношение приложенной к телу силы и получаемого телом ускорения является постоянной величиной.

$$\frac{F}{a} = \text{const.}$$

Физическая величина, характеризующая свойства тела и измеряемая отношением $\frac{F}{a}$ называется инертной массой.

Масса определяет свойство инертности тела, т.е. характеризует его способность получать ускорение под воздействием приложенной силы.

С введением понятия массы второй закон динамики формулируется следующим образом:

Ускорение, полученное телом, прямо пропорционально приложенной силе и обратно пропорционально массе тела.

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}. \quad (2.1)$$

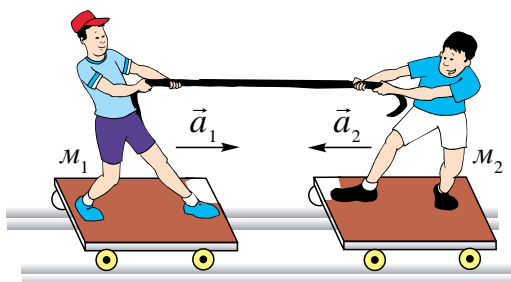


Рис. 2.1.

Этот закон является одним из фундаментальных законов. Ему подчиняется перемещение огромных небесных тел и движение мелких частиц песка, летящих по ветру.

Как было сказано выше, взаимодействие возможно только между несколькими телами. Например, на рисунке 2.1, когда Алишер воздействовал на Баходира при помощи веревки, Баходир также обратное подействовал на Алишера. В результате как Алишер, так и Баходир получили ускорение.

Наблюдая подобные явления, можно сформулировать третий закон динамики.

Действие всегда вызывает противодействие. Силы действия и противодействия двух тел равны по величине, противоположны по направлению и направлены по прямой, проходящей через эти тела.

$$\vec{F}_{1,2} = -\vec{F}_{2,1}. \quad (2.2)$$

Поскольку силы действия и противодействия приложены к разным телам, они не могут уравновесить друг друга, т.е. взаимодействующие тела в результате воздействия этих сил получают разное ускорение:

$$\frac{a_2}{a_1} = \frac{m_1}{m_2}.$$

Образец решения задачи.

Под воздействием силы F тело с массой m_1 получает ускорение 2 м/с^2 . Тело массой m_2 под воздействием этой же силы получает ускорение 5 м/с^2 . Если соединить эти тела, с каким ускорением они будут двигаться под воздействием этой силы?

<p>Дано:</p> $a_1 = 2 \text{ м/с}^2$ $a_2 = 5 \text{ м/с}^2$ $m_1; m_2$. <hr/> <p>Найти:</p> $a - ?$	<p>Формула:</p> $F = m_1 \cdot a_1; \quad F = m_2 \cdot a_2$ $m_1 \cdot a_1 = m_2 \cdot a_2; \quad m_1 = \frac{a_2}{a_1} m_2$ $F = (m_1 + m_2) \cdot a;$ $m_2 a_2 = \left(\frac{a_2}{a_1} m_2 + m_2 \right) \cdot a$ $a = \frac{a_1 a_2}{a_1 + a_2}$	<p>Решение:</p> $a = \left(\frac{2 \cdot 5}{2 + 5} \right) \frac{\text{м}}{\text{с}^2} = \frac{10}{7} \frac{\text{м}}{\text{с}^2} = 1,43 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}.$ <p style="text-align: right;">Ответ: $1,43 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$.</p>
---	---	---



1. В чем заключается ошибка Галилея при формулировании первого закона динамики?
2. Что такое инертная масса?
3. Расскажите об известных вам взаимодействиях тел и приведите примеры.
4. Почему тела не всегда изменяют свою скорость при взаимном воздействии?

Тема 10. ПРИНЦИП ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ ГАЛИЛЕЯ. ИНЕРЦИАЛЬНЫЕ И НЕИНЕРЦИАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОТСЧЕТА

Одной из причин открытия принципа относительности является движение Земли, точнее, гипотеза о вращении ее вокруг своей оси. Возникает такой вопрос: если Земля вращается вокруг своей оси, почему мы не чувствуем это в экспериментах, проведенных на ее поверхности? Занимавшиеся этой проблемой в средние века ученые Николай Орема (XIV век) и Алавуддин Али ал-Кушчи (XV век) пришли к следующему заключению: вращение Земли не влияет на проведенные на ее поверхности эксперименты.

Представим себе, что вы с одноклассниками находитесь в каюте с затемненными внешними окнами в большом корабле. Кто-то из одноклассников интересуется, корабль находится в покое или плывет? Как можно это определить, не выходя на внешнюю палубу? Один из учеников предлагает: «Проведем такой опыт. Возьмем какой-нибудь предмет, бросим сверху вниз вертикально на пол. Если корабль находится в покое, предмет упадет вертикально. Если движется, то, учитывая, что за период падения предмета корабль передвинется вперед, предмет упадет немного назад. При проведении экспериментов все предметы упали вертикально, на одно и то же место. Значит, сделаем вывод, что корабль находится в покое. Однако выйдя на палубу мы увидим, что корабль равномерно движется по воде. Следовательно, механические эксперименты проводятся с одинаковым результатом, что в учебном классе, что в вагоне или корабле, которые движутся прямолинейно и равномерно.

Пусть скорость человека относительно вагона будет v , скорость вагона относительно Земли будет U . Если человек движется в направлении, совпадающем с движением вагона, его скорость относительно Земли будет равна: $U+v$. Если движение происходит в противоположном направлении, скорость равна: $U-v$. Это называется **законом сложения скоростей Галилея**.

Опыты показали, что в разных инерциальных системах отсчета полный оборот минутной стрелки часов происходит за одинаковый период времени.

Перемещение тел в системах отсчета не будет одинаковым. Перемещение идущего по движущемуся вагону человека относительно вагона

будет меньше, чем перемещение этого человека относительно Земли. Масса тела в неподвижной или двигающейся прямолинейно и равномерно инерциальной системе отсчета будет одинакова.

Таким образом, в инерциальных системах отсчета время, масса, ускорение и сила будут *одинаковыми (инвариантными)*.

Если в системе отсчета, которая находится в покое, сила равна F , масса равна m , ускорение равно a , то в системе с прямолинейным и равномерным движением будет соответственно: F' , m' и a' . Из-за того, что $F=F'$; $m=m'$; $a=a'$, второй закон Ньютона выражается в виде: $F=F'=ma$; $F'=m'a'$.

Отсюда вытекает, что законы Ньютона правомерны во всех инерциальных системах отсчета.

Принцип относительности Галилея в общем виде можно сформулировать следующим образом:

Во всех инерциальных системах отсчета все механические процессы протекают одинаково.

Однако нельзя забывать следующее. Мы знаем, что прямолинейное равномерное движение встречается очень редко. Это означает, что очень редко существуют инерциальные системы отсчета, поэтому нужно помнить, что существуют системы, близкие к инерциальным системам отсчета. Землю мы рассматриваем как инерциальную систему отсчета, хотя она вращается вокруг своей оси и вокруг Солнца, а при вращательном движении всегда существует ускорение. Несмотря на это, Земля считается инерционной системой отсчета. Причина этого в том, что ускорение Земли очень маленькое. Например, это ускорение на экваторе равно $0,035 \text{ м/с}^2$ и является очень маленькой величиной по сравнению с ускорением свободного падения, поэтому им можно пренебречь. А при вращении Земли вокруг Солнца ускорение еще меньше, поэтому Землю можно считать инерционной системой отсчета.

Также поезд, который движется относительно Земли прямолинейно и равномерно, можно отнести к инерционным системам отсчета.

Учитывая вышесказанное можно считать, что в системах, двигающихся прямолинейно и равномерно, законы Ньютона будут действительными.

Что же происходит, если система отсчета будет двигаться криволинейно или с ускорением? Такие системы называются **неинерциальными системами отсчета**. Как можно использовать законы Ньютона в неинерциальных системах отсчета? Давайте вспомним причины появления ускорения. Причина появления ускорения – это сила. Значит, чтобы применить второй закон Ньютона, наряду с силами, действующими

на тело со стороны других тел, вводим величину **инерционная сила**. Инерционная сила возникает не в результате действия на тело со стороны других тел, а в результате движения с ускорением системы отсчета. В таком случае второй закон Ньютона имеет вид:

$$m\vec{a}_{\text{отн}} = \vec{F} + \vec{F}_i \quad (2.3)$$

Чтобы найти выражение для инерционной силы, воспользуемся разницей абсолютного значения ускорения $\vec{a}_{\text{аб}}$ и относительного значения ускорения $\vec{a}_{\text{отн}}$. Выражение для инерционной силы приобретает следующий вид:

$$\vec{F}_i = m(\vec{a}_{\text{аб}} - \vec{a}_{\text{отн}}). \quad (2.4)$$

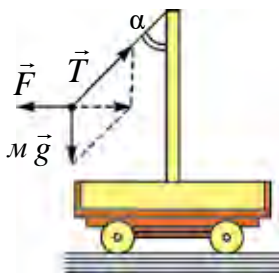


Рис. 2.2.

Сказанное рассмотрим на примере. На маленькой тележке установлена колонна, к которой подвешен маятник, как показано на рисунке 2.2. Тележка движется с постоянным ускорением $\vec{a}_{\text{аб}}$ относительно Земли. Маятник неподвижен относительно тележки: $a_{\text{отн}} = 0$. На маятник действуют силы: $m\vec{g}$, $m\vec{a}_i$ и \vec{T} . \vec{T} – сила упругости нити, на которой висит маятник. Но эти силы не дают ускорения маятнику. Чтобы выполнялся второй закон Ньютона, нужно ввести инерционную силу $\vec{F}_i = -m\vec{a}_i$. Тогда

$$m\vec{g} + \vec{T} + \vec{F}_i = 0.$$

Значит, второй закон Ньютона выполняется условно. Угол наклона маятника: $\text{tg}\alpha = \frac{a_i}{g}$.



1. Что такое инерциальная система отсчета?
2. Какие физические величины одинаковы в инерциальных системах отсчета?
3. Действителен ли третий закон Ньютона для инерциальных систем отсчета?

Тема 11. ДВИЖЕНИЕ В ГРАВИТАЦИОННОМ ПОЛЕ

Вы в 7-ом классе узнали о том, что Земля создает вокруг себя постоянное поле притяжения и с помощью этого поля притягивает к себе все тела. Значит, на любое движение на Земле оказывает свое влияние поле притяжения. Представим, что с вершины горы брошено какое-либо тело в горизонтальном направлении со скоростью v_0 . Тело падает в точке А. Рисунок Ньютона показывает, как это будет выглядеть (рис. 2.3.)

Если скорость тела увеличить, то оно упадет в точке Б или С. Начиная с некоторой определенной скорости тела не падают на Землю, а начинают вращаться вокруг Земли. Такое тело становится искусственным спутником Земли. Движение искусственного спутника является движением в поле притяжения. Почему спутник не падает на Землю? При каких скоростях это происходит? Сначала рассмотрим силы, действующие на спутник. На спутник постоянно действует сила притяжения Земли. Чтобы снизить сопротивление воздуха, спутник нужно поднять в самые верхние слои атмосферы.



Рис. 2.3.

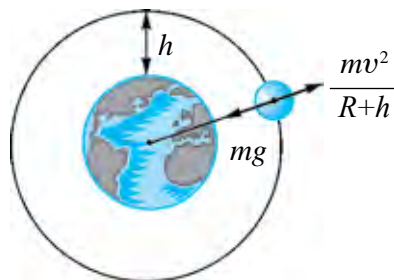


Рис. 2.4.

На высоте 300–400 км от поверхности Земли сопротивление воздуха почти отсутствует. Значит, на таких высотах силу притяжения Земли компенсирует центробежная сила, которая появляется благодаря скорости спутника (рис. 2.4).

В этом случае:

$$mg = \frac{mv^2}{R_{\text{земли}} + h} \quad \text{отсюда } v^2 = g (R_{\text{земли}} + h).$$

В случае, когда высоту h по сравнению с радиусом Земли $R_{\text{земли}}$ можно не учитывать,

$$v^2 = g \cdot R_{\text{Земли}} \quad (2.5)$$

Чтобы вычислить значение v , принимаем $R_{\text{Земли}} \approx 6400$ км, $g = 9,8$ м/с², соответственно $v = 7,91$ км/с.

Эта скорость называется **первой космической скоростью**.

Искусственный спутник Земли, который движется с такой скоростью, делает один оборот вокруг Земли за время: $T_1 = \frac{2\pi R_{\text{Земли}}}{v_1} = 84$ мин 12 сек.

На практике время, за которое спутник совершает один оборот, больше чем расчетное время. Причина этого явления в том, что радиус орбиты спутника и радиус Земли отличаются друг от друга.

Таким образом, скорости спутников, вращающихся на орбитах с большими радиусами, будут меньше, чем скорости спутников, вращающихся на орбитах, близких к поверхности Земли.

Период вращения таких спутников вычисляется по формуле:

$$T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi R_{\text{Земли}}}{v_1} \sqrt{\left(\frac{r}{R_{\text{Земли}}}\right)^3} = T_1 \sqrt{\left(\frac{r}{R_{\text{Земли}}}\right)^3} \quad (2.6)$$

Здесь: T_1 – период вращения спутников, вращающихся на орбитах, близких к поверхности Земли.

Используя формулу периода вращения спутника, вращающегося на произвольных высотах, можно вычислить необходимое расстояние от Земли, на котором спутник должен зафиксироваться. На какой высоте должен двигаться спутник, чтобы период его вращения был равен 24 часам? Расчеты показали, что высота составляет:

$$h = 6,6 R_{\text{Земли}}, \text{ т.е. примерно } 42\,000 \text{ км.}$$

Такая орбита называется *геостационарной* орбитой.

Впервые на нашей планете 4 октября 1957 года на территории бывшего СССР был запущен первый искусственный спутник Земли. Спутник имел форму шара диаметром 58 см и массой 83,6 кг. Этот спутник совершил вокруг Земли 1400 оборотов, т.е. преодолел расстояние в 60 миллионов километров. А 12 апреля 1961 года первый человек полетел в космос. Первый космонавт Юрий Алексеевич Гагарин

был гражданином бывшего СССР. 20 июля 1969 года американские астронавты Нейл Армстронг и Эдвин Олдрин впервые совершили посадку на Луну.

Для того чтобы долететь до планет Солнечной системы, космический корабль должен преодолеть вторую космическую скорость, равную 11,2 км/с.

Для достижения далеких звезд потребуется преодолеть силу притяжения Солнечной системы, т.е. космический корабль должен двигаться с третьей космической скоростью. Величина третьей космической скорости равна 16,7 км/с.

Среди космонавтов, которые многократно летали в космос, наш соотечественник В. Джанибеков и представитель узбекской нации С. Шарипов.



1. Почему Земля не притягивает искусственный спутник, вращающийся вокруг нее?
2. Можно ли рассматривать Луну как спутник, вращающийся с первой космической скоростью?
3. Как меняется скорость искусственного спутника с ростом высоты относительно поверхности Земли?

Тема 12. ЗАВИСИМОСТЬ ВЕСА ТЕЛА ОТ ВИДА ДВИЖЕНИЯ

В настоящее время большинство административных и жилых зданий являются многоэтажными. Для подъема на верхние этажи и спуска вниз пользуются лифтами. Рассмотрим движение человека, поднимающегося и опускающегося в лифте.

1. Человек с массой m стоит в лифте. В случае, когда лифт движется вниз или вверх с постоянной скоростью $\vec{v} = \text{const}$, воздействие, оказываемое на пол человеком (вес) будет: $P = mg$.

Иначе говоря, при движении лифта с постоянной скоростью вес тела будет таким же, каким он был, когда лифт находился в покое (рис. 2.5а).

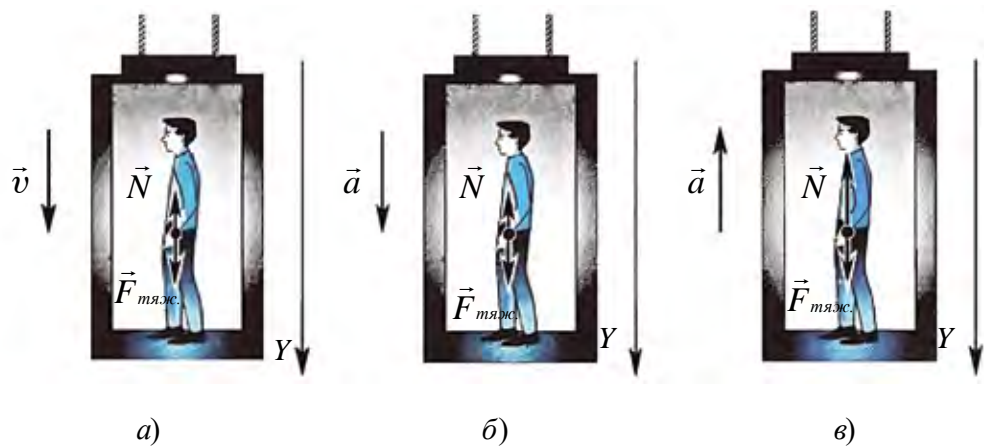


Рис. 2.5.

2. Лифт движется вниз с ускорением \vec{a} (рис. 2.5 б). Согласно второму закону Ньютона:

$$\vec{N} + m\vec{g} = m\vec{a}. \quad (2.7)$$

Здесь \vec{N} – сила реакции пола лифта, m – масса тела.

По третьему закону Ньютона, вес тела $\vec{P} = -\vec{N}$. С учетом формулы (2.7) получаем

$$\vec{P} + m\vec{g} = m\vec{a}.$$

Итоговый вес тела во время движения будет:

$$\vec{P} = m(\vec{g} - \vec{a}) \quad (2.8)$$

Отсюда видно, что когда лифт движется вниз с ускорением a , вес человека уменьшается на величину ma . Если резко освободить трос, который держит лифт, то лифт будет двигаться вниз с ускорением $a = g$, а вес человека будет:

$$P = m(g - a) = 0$$

Состояние, при котором сила взаимодействия тела с опорой или подвесом равна нулю, называется невесомостью.

Значит, чтобы тело перешло в невесомое состояние, оно должно двигаться вниз с ускорением $g=9,81 \text{ м/с}^2$. Отсюда вытекает, что во время свободного падения тела находятся в невесомом состоянии. Частичное состояние невесомости наблюдается при раскачивании на качелях в момент спуска и во время прыжка. Это продолжается очень короткое время. Космонавты, проживающие в искусственных спутниках Земли и на орбитальных станциях, находятся долгое время в состоянии невесомости. В этот период нарушается система кровообращения и питания организма. Для профилактики отрицательных последствий состояния невесомости на орбитальных станциях предпринимаются специальные меры.

3. Лифт поднимается вверх с ускорением \vec{a} (рис. 2.5в). Воздействие, оказываемое человеком на пол (опору) лифта, равняется:

$$\vec{P} = m(\vec{g} + \vec{a}) \quad (2.9)$$

Отсюда видно, что при подъеме лифта вверх с ускорением, вес человека увеличивается на величину ma . Это называется **дополнительная нагрузка (перегрузка)**.

Перегрузка определяется отношением веса тела при движении с ускорением к весу тела в состоянии покоя:

$$n = \frac{m(g+a)}{mg} = 1 + \frac{a}{g}. \quad (2.10)$$

В этом состоянии полная нагрузка приходится на опору. Однако появляются частичные нагрузки на тело человека. Например, вес головы человека давит на шею, вес головы, шеи, плеч и рук давит на корпус и т.д., к ногам. Если ускорение лифта будет в пределах $0,3 - 1 \text{ м/с}^2$, то человек этого не почувствует. Но в сверхзвуковых самолетах, при взлете ракеты ускорение доходит до 100 м/с^2 . По рассказам летчиков и космонавтов, которые находились в этом состоянии, перегрузка прижимала их к креслам, поднять руки было очень трудно, даже открыть глаза удавалось с трудом.

Образец решения задачи.

Лифт опускается вниз с ускорением $4,5 \text{ м/с}^2$. Во сколько раз уменьшается вес тела, находящегося в лифте?

Дано: $a = 4,5 \text{ м/с}^2$ $g = 10 \text{ м/с}^2$	Формула: $P = m(g - a)$ $F = mg \quad n = \frac{F}{P}$	Решение: $n = \frac{10}{(10 - 4,5)} \frac{\text{кг} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}^2}}{\text{кг} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}^2}} = \frac{10}{5,5} = 1,82$
Найти: $n - ?$	$n = \frac{mg}{m(g - a)} = \frac{g}{g - a}$	Ответ: 1,82 раза.



1. В каком состоянии оказывается парашютист, который прыгнул с самолета: а) до открытия парашюта; б) при открытии парашюта; в) во время равномерного спуска с парашютом.
2. В каком состоянии окажется человек, который поднимался вверх или спускался вниз во время торможения лифта?
3. Изменится ли вес тела, если оно движется с ускорением в горизонтальном направлении?

Тема 13. ДВИЖЕНИЕ ТЕЛ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ НЕСКОЛЬКИХ СИЛ

Во время изучения второго закона Ньютона рассматривался случай, когда на тело действовала одна сила. Третий закон Ньютона описывает процесс взаимодействия тел при участии нескольких сил. В повседневной жизни тоже не наблюдаются случаи, где на тело действует только одна сила. На движущиеся тела, кроме силы притяжения, также действует и сила трения. На тело с массой m , стоящее на горизонтальной поверхности, действует сила притяжения $F_{\text{т}}$. В это время на него действует также сила трения $F_{\text{тр}}$. При выполнении условия $F_{\text{т}} > F_{\text{тр}}$, тело придет в движение. Какую силу нужно применить, чтобы определить полученное телом ускорение?

Здесь воспользуемся понятием *равнодействующая сила*. Равнодействующей силой принято считать геометрическую сумму всех приложенных к телу сил, т.е. результирующую силу. В данном случае получаем:

$$\vec{F} = \vec{F}_{\text{т}} + \vec{F}_{\text{тр}}$$

Берется алгебраическая сумма силы притяжения и силы трения. В этом случае силы, действующие на тело, направлены противоположно, и ее модуль определяется как:

$$F = F_{\tau} - F_{\text{тр.}}$$

Полученное телом ускорение по второму закону Ньютона определяется из выражения:

$$a = \frac{F_{\tau} - F_{\text{тр.}}}{m} \quad (2.11)$$

Рассмотрим две задачи, в которых на тело действует несколько сил.

1. Рассмотрим условия равновесия и ускорение падения тела, установленного на наклонной плоскости (рисунок 2.6). Здесь α – угол наклона плоскости. Коэффициент трения наклонной плоскости и доски, поставленной на ней, равен μ .

На доску, находящуюся на наклонной плоскости, действуют: сила тяжести $m\vec{g}$, нормальная сила реакции \vec{N} и направленная вверх по наклонной плоскости сила трения в состоянии покоя $\vec{F}_{\text{тр.}}$.

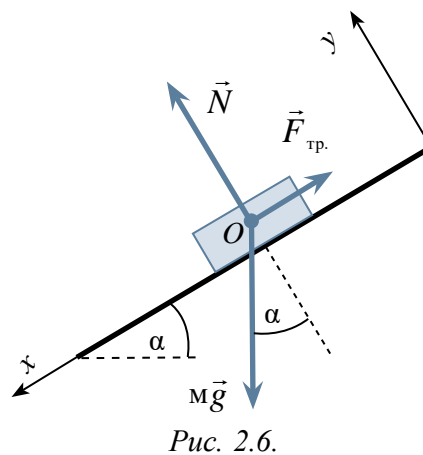


Рис. 2.6.

Ось x направляем вниз по плоскости, ось y направляем перпендикулярно к плоскости.

Чтобы тело оставалось в равновесии на наклонной плоскости, равнодействующая сила действующих на него сил должна быть равна нулю:

$$m\vec{g} + \vec{N} + \vec{F}_{\text{тр.}} = 0.$$

Исходя из этого составим системы уравнений для проекции на оси координат:

1. По оси x : $mg \sin\alpha - \vec{F}_{\text{тр.}} = 0$;
2. По оси y : $mg \cos\alpha + N = 0$.

Чтобы тело оставалось в равновесии на наклонной плоскости, должно выполняться неравенство: $\vec{F}_{\text{тр.}} \geq mg \cdot \sin\alpha$

Согласно первого уравнения $\vec{F}_{\text{тр.}} = mg \cdot \sin\alpha$, по второму уравнению

$N = mg \cdot \cos \alpha$. Если учесть эти выражения и уравнение $\vec{F}_{\text{тр.}} = \mu N$, выполнится неравенство: $mg \sin \alpha \leq \mu mg \cos \alpha$. Из этого получаем: $\text{tg} \alpha \leq \mu$.

Таким образом, при выполнении условия $\text{tg} \alpha \leq \mu$, доска остается в равновесии на наклонной плоскости.

При условии $\text{tg} \alpha \geq \mu$ тело движется с ускорением вниз по наклонной плоскости. Чтобы найти ускорение составим уравнение: $ma = mg \cdot \sin \alpha - \mu mg \cdot \cos \alpha$. Разделив обе стороны уравнения на m , получаем:

$$a = g (\sin \alpha - \mu \cos \alpha) \quad (2.12)$$

2. На неподвижный блок, с ничтожной малой массой подвешены грузы с массами m_1 и m_2 (рисунок 2.7). Если $m_2 > m_1$, найти ускорение движения грузов и натяжения нити. Силой трения на блоке и массой нити пренебречь.

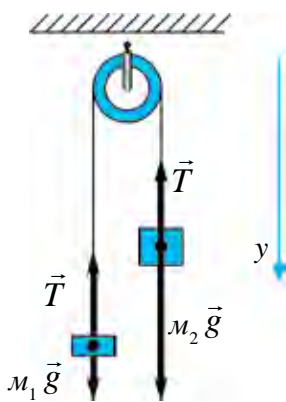


Рис. 2.7.

На каждый груз действуют две силы: сила тяжести и сила натяжения нити. Требование не учитывать массу блока и нити, а также силу трения означает, что они одинаковы на обеих сторонах нити. Силу натяжения нити обозначим T .

Напишем уравнение второго закона Ньютона:

В связи с тем, что нить не растяжима, модуль перемещения грузов и соответственно скорость и ускорение будут равными. Модуль ускорения грузов обозначим как a . Тогда, направив ось y вниз, для проекции на ней составим систему уравнений:

$$\begin{cases} m_1 g - T = -m_1 a, \\ m_2 g - T = m_2 a. \end{cases}$$

Из второго уравнения вычитаем первое уравнение:

$$g (m_2 - m_1) = a (m_2 + m_1).$$

Отсюда

$$a = \frac{m_2 - m_1}{m_2 + m_1} g. \quad (2.13)$$

Решаем оба уравнения относительно T и получаем $T = m_1(g + a)$ в первом уравнении и $T = m_2(g - a)$ во втором уравнении. Это – вес тел, одно из которых движется с ускорением вниз, а второе вверх. Из-за того, что тела движутся с ускорением, их вес будет одинаковым, несмотря на разные массы. Если подставить выражение, найденное для ускорения, в формулу для расчета силы натяжения нити с любой стороны блока, то получим:

$$T = 2 \frac{m_2 m_1}{m_2 + m_1} g \quad (2.14)$$

Из этой формулы находим вес каждого груза.

$$P_1 = P_2 = 2 \frac{m_2 m_1}{m_2 + m_1} g. \quad (2.15)$$



1. Как определяется равнодействующая сила, действующая на тело?
2. В чем заключается преимущество работы с проекциями сил на оси координат по сравнению со сложением векторов?
3. Как определяется условие равновесия тела, когда на него действуют несколько сил одновременно?
4. Почему вес грузов, подвешенных к блоку, становится равным во время движения?

Упражнение 2

1. Крыша дома имеет наклон 30° относительно горизонта. При каком коэффициенте трения между подошвой обуви человека и крыши, он может ходить без скольжения? (Ответ: 0,58.)

2. К концам веревки, пропущенной через неподвижный блок, подвешены грузы массой 50 г и 75 г. Вес веревки и блока можно не учитывать. Считая, что веревка нерастяжимая, найдите ускорение движения грузов и силу натяжения веревки. (Ответ: $1,96 \text{ м/с}^2$; 0,6 Н)

3. На тележку установлен сосуд с жидкостью. Тележка движется в горизонтальном направлении с ускорением a . Какой угол с горизонтом

образует поверхность жидкости при ее уравновешенном состоянии (Ответ: $(tg\alpha = \frac{a}{g})$).

4. Под действием постоянной силы за первую секунду тело прошло путь равный 0,5 м. Какова будет действующая сила, если масса тела равна 25 кг? (Ответ: 25 Н.).

5. Тело массой 50 г, двигаясь под воздействием постоянной силы, за 2 секунды прошло путь 1 м. Чему равна действующая сила? (Ответ: 0,025 Н.).

6. В ведре с водой, находящейся в лифте, плавает тело. Если лифт движется вверх (вниз) с ускорением a , изменится ли глубина погружения тела?

7. На цилиндре массой M закреплена нить. Бросая цилиндр вниз, тянем нить вверх. При этом центр тяжести цилиндра при растянутом состоянии нити остался на той же высоте. Чему равна сила натяжения нити?

8. На горизонтальной доске находится груз. Коэффициент трения между грузом и доской равен 0,1. При каком ускорении в горизонтальном направлении груз соскользнет с доски? (Ответ: 1 м/с^2).

9. На бумаге стоит прямой цилиндр. Высота цилиндра 20 см, диаметр основания 2 см. С каким минимальным ускорением надо тянуть бумагу, чтобы цилиндр опрокинулся? (Ответ: $0,1 \text{ м/с}^2$).

10. Грузовой автомобиль массой 6 тонн без груза начал движение с ускорением $0,6 \text{ м/с}^2$. Какова масса груза, если автомобиль двигается с ускорением $0,4 \text{ м/с}^2$ при такой же силе тяги? (Ответ: 3 тонны).

Тестовые вопросы по итогам главы II

- 1. Закончите предложение. Системы отсчета, которые находятся в покое или прямолинейно равномерно движутся, называются ...**
 - A) ... относительные системы отсчета;
 - B) ... инерциальные системы отсчета;
 - C) ... неинерционные системы отсчета;
 - D) ... абсолютные системы отсчета.
- 2. Как движется тело массой 10 кг под воздействием силы 20Н?**
 - A) равномерно со скоростью 2 м/с;
 - B) ускоренно с ускорением 2 м/с^2 ;
 - C) замедленно с ускорением -2 м/с^2 ;
 - D) равномерно со скоростью 20 м/с.
- 3. В лифте, движущимся вверх с ускорением 1 м/с^2 , стоит человек массой 50 кг. Чему равен вес человека (Н)?**
 - A) 50;
 - B) 500;
 - C) 450;
 - D) 550.

4. На неподвижные блоки через веревку подвешены грузы с массами m_1 и m_2 . С каким ускорением они двигаются при условии $m_1 < m_2$?
- A) $a = \frac{m_2 + m_1}{m_2 - m_1} g$; B) $a = \frac{m_2 - m_1}{m_2 + m_1} g$; C) $a = \frac{m_1 - m_2}{m_2 + m_1} g$; D) $a = 0$.
5. При каком движении лифта у груза, находящегося внутри, увеличивается вес?
- A) вверх с постоянной скоростью;
 B) вниз с постоянной скоростью;
 C) вверх с постоянным ускорением;
 D) когда лифт неподвижен.
6. Что такое геостационарная орбита спутника?
- A) минимальная от поверхности Земли орбита спутника;
 B) максимальная от поверхности Земли орбита спутника;
 C) орбита спутника, которая расположена на определенной высоте от поверхности Земли;
 D) орбита спутника, на которой космонавты ведут наблюдения.
7. Если к концам динамометра приложить две противоположные силы по 60 Н, каково будет показание динамометра?
- A) 15; B) 30; C) 60; D) 120.
8. Силы равные 3 Н и 4 Н приложены к одной точке. Угол между направлениями сил составляет 90° . Найти модуль равнодействующей силы (Н).
- A) 1; B) 5; C) 7; D) 3.

Основные понятия, правила и законы, изученные в главе II

Формулировка первого закона динамики по Галилею.	Если на тело не действуют другие тела, то оно сохраняет свое состояние покоя или прямолинейного равномерного движения относительно Земли.
Первый закон динамики	Существуют такие системы отсчета, называемые инерциальными, относительно которых тело движется прямолинейно и равномерно, или покоится, если на него не действует сила, или действие внешних сил взаимно скомпенсировано.
Сила	Количественное измерение причины получения ускорения тел в результате взаимодействия друг с другом.

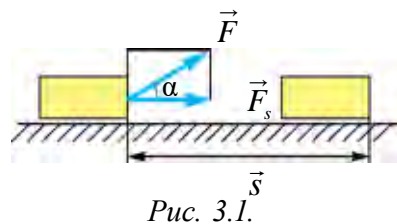
Инертная масса	Физическая величина, определяемая соотношением $\frac{F}{a}$.
Второй закон динамики	Полученное телом ускорение прямо пропорционально приложенной к нему силе и обратно пропорционально массе тела: $\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}$; произведение массы тела на ускорение равно действующей на тело силе: $F = m\vec{a}$ (под «силой» понимается равнодействующая всех сил).
Третий закон динамики	Действие равно противодействию. Тела действуют друг на друга с силами, направленными противоположно вдоль одной и той же прямой, и равными по значению: $\vec{F}_{1,2} = -\vec{F}_{2,1}$.
Инерциальные системы отсчета	Системы отсчета, относительно которых материальная точка находится в покое или движется прямолинейно и равномерно.
Неинерциальные системы отсчета	Системы отсчета, которые движутся криволинейно или с ускорением.
Сила инерции	Сила, которая появляется в результате движения с ускорением
Первая космическая скорость	Скорость, которая необходима телу, чтобы стать искусственным спутником Земли – 7,91 км/с.
Вторая космическая скорость	Скорость, необходимая для полета к планетам солнечной системы – 11,2 км/с.
Третья космическая скорость	Скорость, необходимая для преодоления силы притяжения Солнечной системы и выхода за ее пределы – 16,7 км/с.
Вес тела при движении вертикально с ускорением \vec{a}	$\vec{P} = m(\vec{g} - \vec{a})$ – вес тела, опускающегося вниз. $\vec{P} = m(\vec{g} + \vec{a})$ – вес тела, поднимающегося вверх.
Невесомость	Состояние, при котором сила взаимодействия тела с опорой или подвесом равна нулю.
Перегрузка	$n = \frac{P}{mg} = \frac{g+a}{g}$.

Глава III. ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ В МЕХАНИКЕ

Тема 14. ЭНЕРГИЯ И РАБОТА. ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ. РАБОТА, ВЫПОЛНЯЕМАЯ ПРИ ДВИЖЕНИИ ТЕЛ ПО НАКЛОННОЙ ПЛОСКОСТИ

Энергия – эта количественная мера различных форм движения и взаимодействия (по гречески слово «энергия» означает действие). Энергия в зависимости от вида движения в природе проявляется по-разному. Например, механическая, тепловая, электромагнитная, ядерная энергия и другие. В результате взаимодействия энергия одного вида превращается в энергию другого вида. Однако во всех этих процессах энергия, переданная от одного тела второму (независимо от ее вида), будет равна энергии, полученной вторым телом от первого.

Как известно из второго закона Ньютона, чтобы изменить механическое движение тела на него должны подействовать другие тела. Иначе говоря, среди этих тел происходит обмен энергиями. Для описания такого обмена энергии в механике введено понятие *механическая работа*, которую принято обозначать буквой A .



Механическая работа. Величина, равная скалярному произведению силы на перемещение в направлении действия силы, называется механической работой, т.е.

$$A = (\vec{F} \cdot \vec{s}) = F \cdot s \cdot \cos \alpha. \quad (3.1)$$

Здесь: α – угол между силой \vec{F} и перемещением \vec{s} (рисунок 3.1).

Если учитывать, что $\cos \alpha = \frac{F_s}{F}$; $F_s = F \cdot \cos \alpha$, то уравнение (3.1) примет вид:

$$A = F \cdot s \cdot \cos\alpha = F_s \cdot s. \quad (3.2)$$

Здесь F_s – проекция силы в направлении смещения.

Основываясь на выражении (3.2), можно сделать следующий вывод:

если $\alpha < \frac{\pi}{2}$, то $0 < \cos\alpha < 1$ – работа силы положительна, направление силы и смещение совпадают;

если $\alpha > \frac{\pi}{2}$, то $-1 < \cos\alpha < 0$ – работа силы отрицательная, направления силы и смещения противоположны;

если $\alpha = \frac{\pi}{2}$, то $\cos 90^\circ = 0$ – работа, выполненная силой, равна нулю, направление силы будет перпендикулярным к направлению смещения.

Работа считается аддитивной (*additiv* – по-латински означает суммарный) величиной (в физике аддитивность величины означает, что величина, относящаяся к системе в целом, равна сумме величины, относящихся к ее составным частям).

Если на тело действует несколько сил, то будет:

$$F_s = F_{s1} + F_{s2} + F_{s3} + \dots + F_{sn}$$

тогда полная работа равна работе, выполненной равнодействующей сил.

$$A = F_s \cdot [\Delta s] = F_{s1} \cdot [\Delta s_1] + F_{s2} \cdot [\Delta s_2] + F_{s3} \cdot [\Delta s_3] + \dots + F_{sn} [\Delta s_n]$$

или

$$A = A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_n.$$

Единица работы. Единица измерения работы в системе СИ – Джоуль (Дж):

$$[A] = [F] \cdot [s] = 1 \text{ Н} \cdot 1 \text{ м} = 1 \text{ Н} \cdot \text{м} = 1 \text{ Дж}. \quad (3.3)$$

В качестве единицы работы в СИ принята работа выполненная силой 1Н при смещении тела на 1 м.

Работа силы тяжести. На поверхности Земли на тело действует сила тяжести со стороны Земли, равная $P = mg$. При перемещении тела из точки В на высоте h от поверхности Земли в точку С на высоте h_2 от поверхности Земли, смещение тела равно: $h_1 = h - h_2$ (рис. 3.2).

Здесь выполненная силой тяжести работа выражается следующей формулой:

$$A = Ph_1 = mg(h - h_2) = mgh - mgh_2. \quad (3.4)$$

Здесь: P – вес тела, m – его масса, g – ускорение свободного падения, h – расстояние между уровнями h_1 и h_2 по вертикали.

Работа, выполненная силой тяжести, не зависит от формы пути, зависит только от высоты спуска. Поэтому работа, выполненная под действием силы тяжести, зависит не от формы траектории, а от начального и конечного состояний. Такая сила называется *потенциальной* или *консервативной*. Поле такой силы называется *потенциальным полем*.

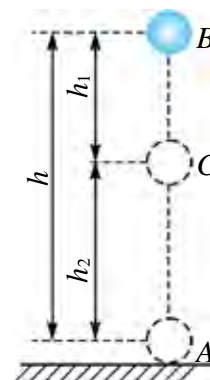


Рис. 3.2.

При движении тела вниз из-за соответствия направления силы тяжести и смещения выполненная работа будет положительной, при движении вверх из-за противоположности направлений работа будет отрицательной. Поэтому в случае, когда тело под воздействием силы тяжести смещено и вернулось обратно, выполненная общая работа равняется нулю.

Полной механической энергией системы называется сумма кинетической и потенциальной энергии системы. Например, полная механическая энергия тела массой m , движущегося со скоростью v относительно Земли на высоте h от поверхности Земли:

$$E = E_k + E_p = \frac{mv^2}{2} + mgh. \quad (3.4)$$

Полная механическая энергия системы остается неизменной с течением времени:

$$E = E_k + E_p = \text{const}. \quad (3.5)$$

Возможны лишь превращения потенциальной энергии и кинетическую и обратно. Выражение (3.5) представляет собой закон сохранения механической энергии.

Проведенные многочисленные эксперименты, теоретические выводы подтвердили строгое соблюдение закона сохранения энергии.

В природе постоянно происходят превращения одного вида энергии в другой (например, механическая энергия переходит в тепловую энергию). Поэтому этот закон также называют законом сохранения и превращения энергии. Этот закон является основным законом природы и действителен не только для макроскопических, но и микроскопических систем.

Энергия никогда не исчезает, ниоткуда не появляется, она может только преобразовываться из одного вида в другой.

В закрытых системах полная энергия сохраняется.

Например, потенциальная энергия тела, падающего с высоты h , зависит от его веса и абсолютно не зависит от времени проведения экспериментов.

Коэффициент полезного действия. Введена величина, показывающая, какая часть израсходованной энергии машин и двигателей превращается в полезную работу.

Отношение полезной работы к полной работе называется коэффициентом полезного действия (КПД) и обозначается буквой η .

Если полезную работу обозначить A_n , полную работу $A_{общ}$, тогда формулу КПД можно записать в виде:

$$\eta = \frac{A_n}{A_{общ}} \cdot 100\%. \quad (3.6)$$

КПД не может быть больше единицы (100%). В машинах и двигателях в результате работы силы трения часть полной энергии расходуется и поэтому КПД всегда меньше единицы.

Рассмотрим наклонную плоскость и выполненную работу при подъеме тела вверх. По «золотому правилу» механики, во сколько раз выигрываем в силе, во столько раз проиграем в расстоянии. Но из-за увеличения расстояния смещения не меняется выполненная работа.

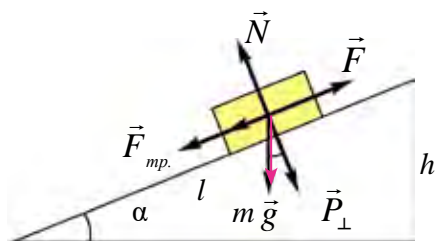


Рис. 3.3.

Рассмотрим груз с весом P на наклонной плоскости длиной l , высотой h (рис. 3.3). Здесь на тело действует сила трения $F_{тр.}$, параллельная наклонной поверхности тянущая вверх сила F , перпендикулярно направленная к наклонной плоскости P_{\perp} и противоположно направленная перпендикулярно к поверхности сила N (реактивная сила поверхности).

Если не учитывать силу трения, получим уравнение:

$$A_s = A_1 = mgh \quad (3.7)$$

Однако с учетом силы трения,

$$A_t = A_1 + A_2 \quad (3.8)$$

отсюда:

$$A_2 = F_{\text{тр.}} \cdot l = \mu N \cdot l = \mu mg \cdot \cos \alpha \cdot \frac{h}{\sin \alpha} = \mu mg \cdot \operatorname{ctg} \alpha \quad (3.9)$$

Тогда A пишется в следующем виде:

$$A_{\text{общ.}} = mgh + \mu mgh \cdot \operatorname{ctg} \alpha = mgh(1 + \mu \cdot \operatorname{ctg} \alpha). \quad (3.10)$$

Коэффициент полезного действия:

$$\eta = \frac{A_{\text{п}}}{A_{\text{общ}}} = \frac{mgh}{mgh(1 + \mu \cdot \operatorname{ctg} \alpha)} = \frac{1}{1 + \mu \cdot \operatorname{ctg} \alpha}. \quad (3.11)$$

Сила притяжения, действующая на груз, равна:

$$\vec{F} = \vec{F}_{\text{п}} + \vec{F}_{\text{тр}} = \vec{P} \cdot \sin \alpha + \mu \vec{N} \cos \alpha = mg(\sin \alpha + \mu \cos \alpha). \quad (3.12)$$



1. Дайте определение механической работы?
2. Чему равна работа силы тяжести?
3. Всегда ли выполняется закон сохранения энергии в природе?
4. Дает ли выигрыш в работе наклонная поверхность?

Тема 15. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА: ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ НАКЛОННОЙ ПЛОСКОСТИ

Цель работы: изучить наклонную плоскость и выяснить, в каких целях можно ее использовать. Сформировать навыки измерения веса тел с помощью динамометра. Укрепить на практике знания о полезной и полной работе, а также о коэффициенте полезного действия. Сформировать навыки расчетов погрешностей.

Необходимые принадлежности: длинная тонкая доска, штатив с зажимами, деревянный брусок, набор грузов, динамометр.

Выполнение работы: 1) тонкая доска закрепляется наклонно с помощью штатива (рис. 3.4). Затем измеряется длина l и высота h наклонной плоскости;

2) с помощью динамометра определяется вес деревянного бруска;

3) установив брусок на наклонную плоскость, равномерно (без толчков) тянем его вверх с силой F ;

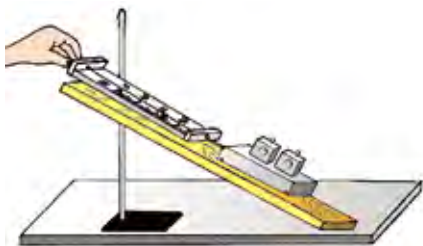


Рис. 3.4.

4) вычисляется полная работа по формуле $A = F \cdot l$ и полезная работа по формуле $A_{\text{п}} = P \cdot h$;

5) с помощью формулы $\eta = \frac{A_{\text{п}}}{A_{\text{общ}}}$ вычисляется коэффициент

полезного действия наклонной плоскости.

Опыты проводятся не менее трех раз и результаты записываются в следующую таблицу.

№	l , (м)	h , (м)	F , (Н)	P , (Н)	$A_{\text{п}}$, (Дж)	$A_{\text{р}}$, (Дж)	η , (%)
1							
2							
3							

Опыты проводятся на разных наклонных плоскостях (с разными высотами), делается вывод о зависимости коэффициента полезного действия от угла наклона плоскости.



1. Что такое наклонная плоскость и в каких целях она используется?
2. Как определяется полезная и полная работа?
3. В чем причина того, что полезная работа меньше, чем полная работа?
4. Как объяснить зависимость коэффициента полезного действия от угла наклона плоскости?

Тема 16. АБСОЛЮТНО УПРУГИЕ И НЕУПРУГИЕ СТОЛКНОВЕНИЯ ТЕЛ

Столкновением называется очень кратковременное взаимодействие двух или более тел.

Столкновения в природе встречаются очень часто. Столкновение бильярдных шаров, прыжок человека на землю, удар по гвоздю молотком, удар по мячу футболиста и т.д. являются тому примерами.

По деформации тел в результате столкновения последние разделяются на два вида: абсолютно упругое и абсолютно неупругое.

Абсолютно неупругое столкновение.

Абсолютно неупругим называется столкновением двух деформируемых шаров, которые после соприкосновения движутся вместе или с одинаковыми скоростями. После столкновения шары могут двигаться, объединившись. Примером может послужить столкновение шаров, изготовленных из пластилина или глины (рисунок 3.5).

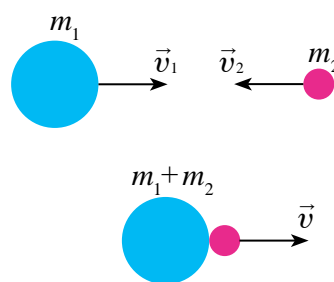


Рис. 3.5.

Пусть скорость тела с массой m_1 до момента столкновения будет \vec{v}_1 , скорость тела с массой m_2 до момента столкновения будет \vec{v}_2 . Если скорость после столкновения будет \vec{v} , то, применяя закон сохранения импульса, получим следующее:

$$m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 = (m_1 + m_2) \vec{v}.$$

Отсюда следует:

$$\vec{v} = \frac{m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2}{m_1 + m_2}. \quad (3.13)$$

При абсолютно неупругом столкновении не выполняется закон сохранения механической энергии, часть энергии расходуется на внутреннюю энергию шаров.

Абсолютно упругим столкновением называется столкновение двух недеформируемых шаров. При этом механическая энергия системы остается прежней.

При абсолютно упругом столкновении выполняются законы сохранения импульса и кинетической энергии.

Скорости тел с массами m_1 и m_2 до столкновения пусть будет соответственно \vec{v}_1 и \vec{v}_2 , а после столкновения \vec{v}'_1 и \vec{v}'_2 . Для учета направления движения тел (слева направо и справа налево) будет считать

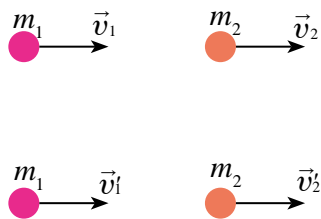


Рис. 3.6.

скорость движения в правую сторону положительной, а в левую – отрицательной (рис. 3.6). Закон сохранения импульса и кинетической энергии для этого случая будет следующим:

$$m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 = m_1 \vec{v}'_1 + m_2 \vec{v}'_2 \quad (3.14)$$

$$\frac{m_1 \cdot v_1^2}{2} + \frac{m_2 \cdot v_2^2}{2} = \frac{m_1 \cdot v_1'^2}{2} + \frac{m_2 \cdot v_2'^2}{2}$$

Совместно решив эти уравнения, можем найти скорости v'_1 и v'_2 :

$$v'_1 = \frac{2m_2 v_2 + (m_1 - m_2)v_1}{m_1 + m_2}, \quad v'_2 = \frac{2m_1 v_1 + (m_2 - m_1)v_2}{m_1 + m_2}. \quad (3.15)$$



1. Какое столкновение называется абсолютно неупругим столкновением?
2. Выполняется ли закон сохранения энергии при абсолютно неупругом столкновении?
3. Какое столкновение называется абсолютно упругим столкновением?

Образец решения задачи.

Под воздействием постоянной силы F вагон прошел 5 м со скоростью 2 м/с. Если масса вагона 400 кг и коэффициент трения 0,01, определите значение выполненной силой F работы A .

Дано:
 $F = \text{const};$
 $s = 5 \text{ м};$
 $v = 2 \text{ м/с}$
 $m = 400 \text{ кг};$
 $\mu = 0,01$

Найти:
 $A - ?$

Решение:

Выполненная силой F работа A равна сумме выполненной работы при смещении вагона A_0 и выполненной работы для передачи вагону кинетической энергии E_k

$$A = A_0 + E_k.$$

Здесь $F_{\text{тр.}} = \mu P$. Учитывая, что $P = mg$, рассчитываем $A_0 = F_{\text{тр.}} \cdot s = \mu mgs$. Кинетическая энергия, полученная вагоном, равна.

$$E_k = \frac{mv^2}{2}$$

Таким образом, работа выполненная силой F равна:

$$A = \mu mgs + \frac{mv^2}{2}. \text{ Используя данные, находим:}$$

$$A = 0,01 \cdot 400 \cdot 9,8 \cdot 5 \text{ Дж} + \frac{1}{2} \cdot 400 \cdot 4 \text{ Дж} = 996 \text{ Дж}.$$

Ответ: $A = 996 \text{ Дж}.$

Упражнение 3

1. Вагон массой 20 т, двигающийся со скоростью 0,3 м/с, догоняет вагон массой 30 т, двигающийся со скоростью 0,2 м/с. Найдите скорость вагонов, если их столкновение будет неупругим? (Ответ: $v = 0,24 \text{ м/с}$).

2. Сколько работы выполняет человек при подъеме тела массой 2 кг на высоту 1 м и с ускорением 3 м/с²? (Ответ $A = 26 \text{ Дж}$).

3. Если, космический корабль массой 6,6 т движется по орбите со скоростью 7,8 м/с, чему будет равна его кинетическая энергия? (Ответ: $E_k = 200 \text{ ГДж}$).

4. Чему равна потенциальная и кинетическая энергия тела массой 3 кг, свободно падающего с высоты 5 м, на высоте 2 м от поверхности земли? (Ответ: $E_{\text{п}} = 60 \text{ Дж}; E_k = 90 \text{ Дж}$).

5. С какой начальной скоростью v_0 нужно бросить мяч с высоты h , чтобы мяч подпрыгнул обратно от земли на высоту $2h$? Столкновение считать абсолютно упругим. (Ответ: $v_0 = \sqrt{2gh}$).

6. Материальная точка массой 1 кг равномерно движется по кругу со скоростью 10 м/с. Найдите изменение импульса за одну четвертую часть

периода, за половину периода и за полный период обращения. (*Ответ:* 14 кг м/с; 20 кг м/с; 0).

7. Тело массой 0,5 кг брошено вертикально вверх со скоростью 4 м/с. Найдите выполненную работу, изменение потенциальной и кинетической энергии на максимальной высоте подъема. (*Ответ:* 4 Дж; 4 Дж; -4 Дж).

8. Деформируемые шары массами 1 кг и 2 кг движутся навстречу друг другу со скоростями 1 и 2 м/с соответственно. Найдите изменение кинетической энергии системы после столкновения. (*Ответ:* 3 Дж).

9. Троллейбус массой 15 т двинулся с места с ускорением $1,4 \text{ м/с}^2$. Коэффициент сопротивления 0,02. Найдите работу, выполненную силой тяги на первых 10-ти метрах пути и работу, выполненную силой сопротивления. Сколько кинетической энергии получил троллейбус? (*Ответ:* 240 кДж; -30 кДж; 210 кДж).

10. Лыжа спускается с холма высотой 2 м и шириной основания 5 м и, проехав расстояние 35 м от основания холма, останавливается. Приняв, что трение на всем пути одинаково, найдите коэффициент трения. Подобным образом на опыте найдите коэффициенты трения, например, между спичечной коробкой и линейкой. (*Ответ:* 0,05).

Тестовые вопросы по итогам главы III

- Дополните предложение. ... является количественной мерой различных форм движения и взаимодействия.**

А) Энергия ...; В) Потенциальная энергия ...;
С) Кинетическая энергия Д) Электрическая энергия
- Какая единица измерения энергии принята в СИ?**

А) Ватт; В) Джоуль; С) Калория; Д) Н м.
- Дополните предложение. ... это величина, равная скалярному произведению силы на смещение в результате действия этой силы.**

А) Энергия ...; В) Потенциальная энергия ...;
С) Кинетическая энергия ...; Д) Механическая работа
- Энергия никогда не исчезает, нигде не появляется, она может только переходить из одного вида в другой. О каком законе идет речь?**

А) Первый закон Ньютона; В) Второй закон Ньютона;
С) Закон сохранения энергии; Д) Третий закон Ньютона.

5. **Что означает отношение полезной работы к полной работе?**
 - A) Энергию;
 - B) Потенциальную энергию;
 - C) Кинетическую энергию;
 - D) КПД.

6. **Дополните предложение. ... системы – это сумма его кинетической и потенциальной энергии.**
 - A) Энергия ... ;
 - B) Полная механическая энергия ...;
 - C) Кинетическая энергия ...;
 - D) Механическая работа

7. **Дополните предложение. ... называется очень кратковременное взаимодействие двух или более тел.**
 - A) Абсолютно упругим ...;
 - B) Абсолютно неупругим ...;
 - C) Столкновением
 - D) Перемещением

8. **Дополните предложение. ... столкновением называется столкновение двух деформируемых шаров.**
 - A) Абсолютно упругим... ;
 - B) Абсолютно неупругим...
 - C) Столкновением
 - D) Перемещением

9. **Дополните предложение. столкновением называется столкновение двух недеформируемых шаров.**
 - A) Абсолютно упругим... ;
 - B) Абсолютно неупругим...
 - C) Столкновением
 - D) Перемещением

10. **Поставьте правильный ответ вместо точек. Силы, зависящие от начального и конечного положения тела, называются силами.**
 - A) ... вес ...;
 - B) ... положительными ...;
 - C) ... потенциальными или консервативными ...;
 - D) ... отрицательными

**Основные понятия, правила и законы,
изученные в главе III**

Энергия	Количественная мера различных форм движения и взаимодействия. Единица в системе СИ – 1 Дж.
Механическая работа	Величина, равная скалярному произведению силы на смещение, полученное в результате воздействия этой силы. $A = F \cdot s \cdot \cos\alpha$.
Полная механическая энергия системы	Сумма кинетической и потенциальной энергии системы.
Закон сохранения энергии	Энергия никогда не исчезает, ниоткуда не появляется, она может только переходить из одного вида в другой.
Коэффициент полезного действия	Отношение полезной работы к полной работе: $\eta = \frac{A_{\text{п}}}{A_{\text{общ}}} \cdot 100\%$
Столкновение	Взаимодействие двух или более тел за очень короткий промежуток времени.
Абсолютно упругое столкновение	Столкновение двух недеформируемых шаров.
Абсолютно упругое столкновение	Столкновение двух деформируемых шаров, которые движутся затем вместе или с одинаковыми скоростями.

Глава IV. СТАТИКА И ГИДРОДИНАМИКА

Тема 17. УСЛОВИЯ РАВНОВЕСИЯ ТЕЛ

Рассмотрим силы, действующие на подвешенную к потолку лампу (рис. 4.1). Для начала вспомним изученное в 6-м классе понятие «центр масс» тела.

Центр масс – это воображаемая точка, в которой воплощена вся масса тела.

Исходя из этого будем считать, что силы, действующие на тело, приложены к центру масс. На подвешенную лампу действует направленная вниз сила тяжести \vec{P} . При этом туго натягивается удерживающая ее нить. Возникающая в нити сила натяжения \vec{F} и сила тяжести \vec{P} действуют вдоль одной прямой линии, которая проходит через центр масс и направлены противоположно. Эти

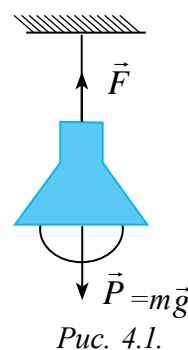


Рис. 4.1.

силы равны по модулям. Если эти силы сложить по правилу сложения векторов, то результирующая сила становится равной нулю. Поэтому лампа остается в положении равновесия.

Рассмотрим случай, когда тело покоится в равновесии на наклонной плоскости (рис. 4.2). Рассмотрим действующие относительно центра масс силы в этом случае. На тело действует сила тяжести $m\vec{g}$.

Эту силу разделим на составляющие: \vec{F}_1 и \vec{F}_2 .

При этом сила \vec{F}_1 стремится сдвинуть тело вниз по наклонной плоскости, сила \vec{F}_2 представляет силу давления на площадь наклонной плоскости. Эта сила приводит к образованию силы реакции \vec{N} на тело со

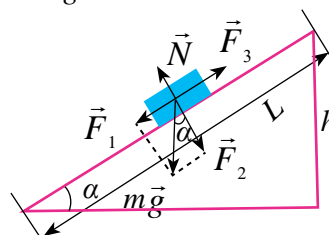


Рис. 4.2

стороны наклонной плоскости. Также на тело действует сила трения \vec{F}_3 в противоположном относительно скольжения направлении.

В этом случае векторная сумма всех действующих сил тоже будет равна нулю.

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{N}_1 + \vec{F}_3 = 0.$$

Исходя из вышесказанного можно сделать следующие выводы:

Для того чтобы тело или система тел, не имеющие вращения оси, остались в равновесии, векторная сумма всех действующих на них сил должна быть равна нулю.

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \dots + \vec{F}_n = 0.$$

Виды равновесия.



Рис. 4.3.

Если некоторое тело находится в состоянии равновесия, это не означает, что оно постоянно будет находиться в таком состоянии (рис. 4.3). В реальных условиях тело подвергается неожиданным воздействиям извне, которые невозможно избежать. Главное, что нужно знать – останется ли тело после такого воздействия в равновесии или равновесие будет нарушено. Для этого необходимо учесть направление результирующей силы внешнего воздействия. В зависимости от направления результирующей силы различают три вида равновесия.

1. Устойчивое равновесие. При выведении тела из положения равновесия возникают силы, возвращающие тело в прежнее положение, это называется *устойчивым равновесием* (рис. 4.4а). В данном случае, при небольшом смещении шарика, лежащего на дне сферического углубления, равнодействующая сила возвращает его в положение равновесия.

2. Неустойчивое равновесие. При выведении тела из положения равновесия возникают силы, удаляющие его от положения равновесия, это называется *неустойчивым равновесием* (рис. 4.4б). В данном случае шарик находится в верхней точке выпуклой сферической поверхности. При небольшом смещении из положения равновесия равнодействующая

сила действующих на него сил удаляет его еще дальше от состояния равновесия.

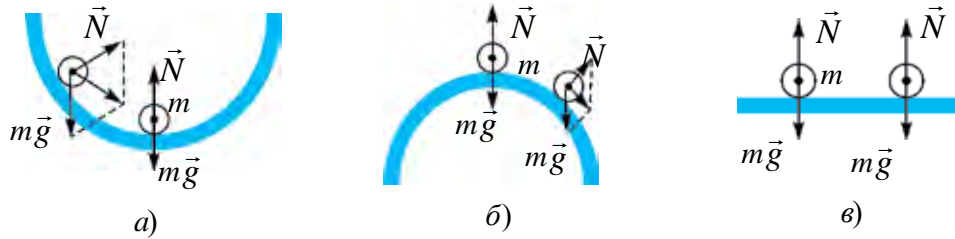


Рис. 4.4.

3. Безразличное равновесие. Равновесие, при котором смещение тела в любом направлении не вызывает изменения действующих на него сил и равновесие тела сохраняется, называется *безразличным равновесием* (рисунок 4.4в). Если приложить силу к шарик, находящемуся на горизонтальной поверхности, то он переместится на другое место.

Если на тело, показанное на рисунке 4.5 действует сила F_1 в точке B ниже центра тяжести ($F_1 > F_{тр.}$; $F_{тр.}$ – сила трения), тело приходит в поступательное движение. Не меняя величину силы, приложим ее к точке A , при этом тело начинает наклоняться. Начинает уменьшаться расстояние l между крайними точками нижнего основания контура и вектором, направленным вниз из центра тяжести. Если продолжить прикладывать силу, вектор G выйдет за пределы контура тела и оно опрокинется.

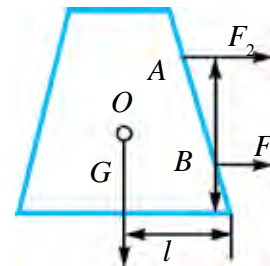


Рис. 4.5.

Таким образом, равновесие тела зависит от:

- 1) веса тела;
- 2) величины площади основания тела;
- 3) места приложения сил относительно центра тяжести.

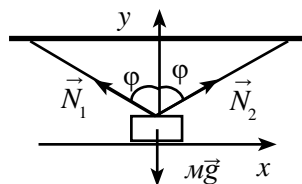
$$F_1 = \frac{mgl}{h}. \quad (4.1)$$

Образец решения задачи.

1. Тело массой 10 кг подвешено на двух нерастяжимых тросах. Они остаются в равновесном состоянии, образуя между собой угол равный 60° . Вычислите силу натяжения тросов.

Дано:
 $m = 10 \text{ кг}$
 $\varphi = 60^\circ$

Найти:
 $N_1 = ?; N_2 = ?$



Решение:

Согласно чертежу, действующие на груз силы \vec{N}_1 , \vec{N}_2 и $m\vec{g}$ пересекаются в одной точке.

Следовательно, условие равновесия определяется двумя

уравнениями:

$$N_1 \sin \varphi - N_2 \sin \varphi = 0;$$

$$N_1 \cos \varphi + N_2 \cos \varphi - mg = 0.$$

После внесения математических изменений получим:

$$N_1 = N_2; 2 N_1 \cos \varphi = mg; N_1 = N_2 = \frac{mg}{2 \cos \varphi};$$

$$N_1 = N_2 = \frac{10 \text{ кг} \cdot 10 \frac{\text{М}}{\text{с}^2}}{2 \cos 60^\circ} = 100 \text{ Н}.$$

Ответ: 100 Н.



1. Что происходит, если воздействовать силой в направлении точки центра тяжести тел?
2. Что происходит, когда на тела, не имеющие оси вращения, действуют силы, суммарный вектор которых равняется нулю?
3. Приведите примеры видов равновесия из жизни и техники.

Тема 18. МЕХАНИЗМЫ, РАБОТАЮЩИЕ НА ОСНОВЕ ПРАВИЛА МОМЕНТОВ.

В 6 классе вы ознакомились с работой простых механизмов: рычага, подвижных и неподвижных блоков, ворота, лебедки. Обратите внимание на то, что у всех этих механизмов есть оси вращения.

Для того чтобы такие тела находились в равновесии, недостаточно чтобы векторная сумма всех действующих сил была равна нулю. Очень важно, насколько далеко находится точка приложения сил от оси вращения.

Самое короткое расстояние от точки приложения сил до оси вращения называется **плечом сил**. При этом сила и плечо силы всегда взаимно перпендикулярны.

Произведение силы на плечо силы называется моментом сил:
 $M = F \cdot l$.

Единица измерения момента сил $[M] = 1 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

Тело под воздействием момента сил поворачивается вокруг оси вращения. При этом момент силы, действующей на тело, похож на действие парных сил. Под парными силами понимаются силы, имеющие противоположные направления, равные по величине, но не лежащие на одной оси.

В качестве примера можно привести поворот руля автомобиля (рисунок 4.6). Ось вращения находится в центре руля, на него действует парные силы F_1 .

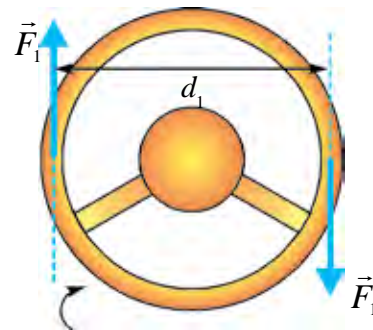


Рис. 4.6.

Итоговый момент силы находится путем сложения моментов, поворачивающих руль в одну сторону.

$$M = F_1 \frac{d_1}{2} + F_1 \frac{d_1}{2} = F_1 d_1.$$

Если на тело, имеющее ось вращения, действуют несколько сил, то итоговый момент находится путем сложения моментов этих сил. При этом моменты сил, вращающих тело по часовой стрелке, берутся с положительным знаком, моменты сил, вращающие тело против часовой стрелки, берутся с отрицательным знаком.

На рисунке 4.7 приводится масштабная линейка, подвешенная через ось O на штатив, и грузы, установленные на разных расстояниях. Здесь грузы весом F_1 , установленные в точке A на расстоянии l_1 от оси вращения, создают момент сил, вращающий линейку по часовой стрелке. Грузы весом F_2 , установленные в точке B на расстоянии l_2 от оси вращения, создают момент сил, вращающий линейку против часовой стрелки. Чтобы найти итоговый момент силы, суммируем моменты сил, действующих на тела, с учетом их знаков:

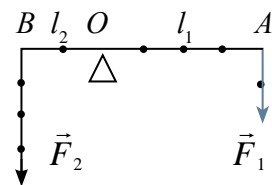


Рис. 4.7.

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

То есть, чтобы тело оставалось в равновесии, должно выполняться условие $M = 0$.

Из условия равновесия тел, имеющих ось вращения, следует:

Тело, имеющее ось вращения, остается в равновесии, если векторная сумма моментов действующих на него сил равна нулю:

$$\vec{M}_1 + \vec{M}_2 + \vec{M}_3 + \dots + \vec{M}_n = 0. \quad (4.2)$$

Это правило сформулировано Архимедом и называется *правилом моментов*. К простым механизмам, работающим на основе правила моментов, относятся: рычаг, неподвижный и подвижный блоки, ворот, винт (домкрат).

Рычаг. На практике применяют три вида рычага (рис. 4.8).

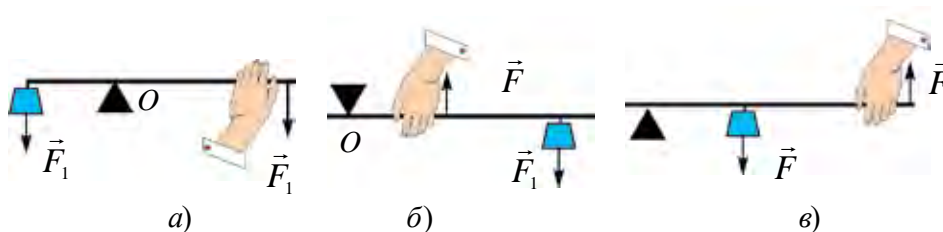


Рис. 4.8.

В двухплечном рычаге (рис. 4.8а) опора находится между точками приложения сил.

В одноплечном рычаге (рис. 4.8б) опора находится на конце рычага, груз ставится на второй конец рычага. Удерживающая сила приложена между опорой и точками размещения груза. В этом случае силы направлены в противоположном направлении. Рука человека, приспособление для колки орехов могут быть примерами (рис. 4.9).

В случае третьего вида рычага (рис. 4.8в) опора находится на одном конце рычага, а груз размещают между опорой и точкой, куда приложена удерживающая сила. Здесь силы также направлены противоположно. Ручные тачки, ухват могут служить примерами (рис. 4.10).

Блоки. В быту и технике часто применяют блоки, в частности используют комплекс неподвижных и подвижных блоков. В комплексе блоки соединяются между собой и создают *степенной полиспаст*.



Рис. 4.9.

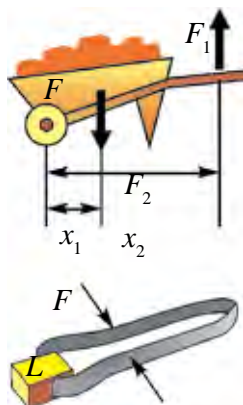


Рис. 4.10.

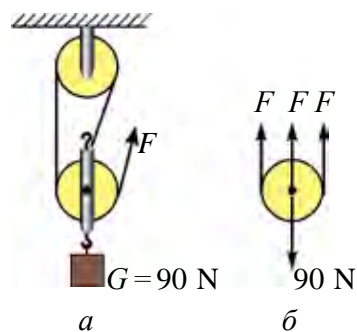


Рис. 4.11

На рисунке 4.11 изображен *степенной полиспаст*. В степенном полиспасте вес груза, подвешенного к полиспасту, распределяется между несколькими тросами.

$$F = \frac{P}{n}. \quad (4.3)$$

В зависимости от того, сколько будет тросов в системе, во столько раз меньше потребуется сил, чтобы поднять груз.



1. По какому правилу складываются моменты сил, действующих на тело?
2. Приведите примеры равновесия тел, имеющих оси вращения.
3. Как меняется величина силы полиспаста с увеличением количества его неподвижных блоков?

Тема 19. ДИНАМИКА ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ

При просмотре фильмов-боевиков вы могли наблюдать, что при резком вращении руля автомобиля машина опрокидывается. В цирке мотоциклисты катаются по поверхности стен.

Проведем такой опыт. Нальем воду в ведро и раскрутим его в вертикальной плоскости. При определенной скорости вращения вода не выливается из ведра.

Из приведенных выше примеров можно сделать заключение, что существует сила, которая опрокинет машину при резком повороте, удержит мотоциклиста на стене и не даст вылиться воде из ведра при вращении.

Откуда появляется эта сила? От чего зависит ее величина?

Для этого вспомним о возникновении центростремительной силы в теле при равномерном вращательном движении:

$$F_{\text{ц.с.}} = \frac{mv^2}{R}. \quad (4.4)$$

По третьему закону Ньютона:

$$F_{\text{ц.с.}} = F_{\text{ц.б.с}}$$

и при вращении появляется также центробежная сила. $\vec{F}_{\text{ц.б.с}}$.

Вот эта центробежная сила опрокинет резко разворачивающуюся машину, удержит воду в ведре при вращении и т.д.

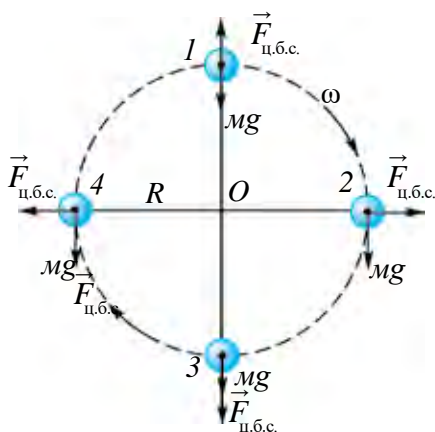


Рис. 4.12.

На рисунке 4.12 показаны силы, действующие на тело, которое совершает вращательные движения по кругу радиусом R. В точке 1, из-за того что центробежная сила $\vec{F}_{\text{ц.б.с}}$ направлена противоположно силе тяжести $m\vec{g}$, вес тела уменьшается:

$$P_1 = mg - \frac{mv^2}{R}. \quad (4.5)$$

В точке 3 сила тяжести тела и центробежная сила направлены вниз, т.е. в одном направлении. В этом случае вес тела растёт:

$$P_2 = mg + \frac{mv^2}{R}. \quad (4.6)$$

Центробежную силу нужно учитывать при вращении тела и в случаях поворота в ходе движения.

Кроме того, на поворотах дороги под воздействием центробежной силы наблюдается отклонение тела от вертикального положения. Чтобы

это не приводило к авариям, велосипедисты или мотоциклисты должны двигаться с небольшим уклоном в сторону от центра вращения (рис. 4.13а).

Для уравнивания этой силы специально для автомобилей на поворотах строят участки дороги с уклоном с одной стороны (рис. 4.13б). Для трамваев и поездов рельсы на поворотах дороги с внешней стороны круга делаются чуть выше.



Рис. 4.13.

Образец решения задачи.

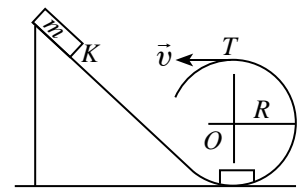
При движении по кругу тело опускается вниз. При каком радиусе круга тело не упадет с точки *T*. Скорость тела в точке *T* равна 30 м/с.

Дано:
 $v = 30$ м/с
 $g = 10$ м/с²
 Найти:
 $R = ?$

Решение:
 Чтобы тело не упало из точки *T* должно $F_T = F_{ц.б.с}$ выполняться следующее условие:

$$mg = \frac{mv^2}{R} \Rightarrow g = \frac{v^2}{R} \Rightarrow R = \frac{v^2}{g};$$

$$R = \frac{30^2}{10} \frac{\text{м}^2/\text{с}^2}{\text{м}/\text{с}^2} = 90 \text{ м.}$$



Ответ: 90 м.

- ?** 1. Назовите приборы, работающие на основе действия центробежной силы?
2. Почему ограничивается скорость автомобилей на повороте?
3. Что должен делать водитель автомобиля при приближении к резким поворотам? Почему водитель должен быть очень осторожным на мокрой дороге, когда на дороге много листьев или гололед?

Тема 20. ДВИЖЕНИЕ ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ. ТЕОРЕМА НЕПРЕРЫВНОСТИ ТЕЧЕНИЯ. УРАВНЕНИЕ БЕРНУЛЛИ.

Вы знаете, что в состоянии покоя жидкости и газы оказывают давление на стенки сосуда. В природе и в быту жидкость находится не только в состоянии покоя, но и в движении. Какие силы возникают в текущей по арыкам, каналам, рекам и водопроводным трубам воде?

Для изучения этого явления рассмотрим поверхность воды, текущей в арыке. В середине широкого полноводного канала вода, в основном, течет равномерно по одной линии. В этом можно удостовериться, наблюдая за телами, плывущими в воде (рис. 4.14). Такое течение называется *послойным* или *ламинарным*. Вода в горной реке течет быстро. Если наблюдать за телами, плывущими по этой реке, то можно увидеть, что течение образует водовороты (рис. 4.15). Такое течение называется *турбулентным*. Значит, если жидкость течет по трубам, то за счет трения о стенки трубы слои жидкости текут с разной скоростью: в середине трубы – быстрее, у стенок – медленнее. Рассмотрим течение жидкости по трубке с изменяющимся поперечным сечением, не учитывая трение (рис. 4.16).

Жидкость затекает в часть трубки с сечением S_1 со скоростью v_1 и протекает через участок с сечением S_2 со скоростью v_2 . За короткий промежуток времени Δt через площадь S_1 протечет вода массой m_1 , через площадь S_2 протечет вода массой m_2 . По закону сохранения массы $m_1 = m_2$. Если вместо массы воды поставить плотность ρ и объем воды V , получим: $\rho_1 S_1 v_1 \Delta t = \rho_2 S_2 v_2 \Delta t$. Если учесть, что жидкость не сжимается, т.е.: $\rho_1 = \rho_2$, тогда выходит, что $S_1 v_1 \Delta t = S_2 v_2 \Delta t$.



Рис. 4.14.



Рис. 4.15.

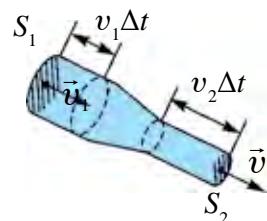


Рис. 4.16.

Обе стороны уравнения делим на Δt и получаем:

$$S_1 v_1 = S_2 v_2 \quad (4.7)$$

Полученный результат можно сформулировать следующим образом:

Модули скоростей несжимаемой жидкости, текущей по трубам с разными сечениями, обратно пропорциональны сечениям трубы.

Это называется уравнением *непрерывности течения* для несжимаемой жидкости.

Таким образом, в широком месте трубки скорость жидкости будет меньше, чем в узком месте. Например, когда нужно, чтобы вода из водопроводного шланга брызгала дальше, нужно сжать отверстие шланга.

Рассмотрим распределение давления в двигающихся жидкостях.

Пусть вода течет по трубе разного сечения, с тонкими измерительными трубками наверху (рис 4.17). При стационарном течении жидкость по измерительным трубкам поднимается вверх. По высоте подъема жидкости можно сделать вывод об оказываемом ею на стенки трубы давлении. Опыты показывают, что в широких местах трубы давление будет больше, чем в узких местах. Согласно уравнению непрерывности течения, скорость течения в широкой части будет меньшей, а в узкой части будет больше. На основании вышеизложенного можно сделать следующий вывод:



Рис. 4.17.

В потоке жидкости давление велико, если скорость течения мала, и давление мало, если скорость велика.

Математическое выражение зависимости давления жидкости от скорости течения определил в 1738 году Д. Бернулли.

Уравнение Бернулли можно вывести из закона сохранения механической энергии применительно к течению жидкости.

Установим трубку с изменяющимся сечением, по которой течет жидкость, под наклоном относительно горизонта. (рис. 4.18).

На широком отрезке трубки за время t через сечение AB протекает определенный объем жидкости. Поскольку жидкость считается несжимаемой, через сечение CD за это время протекает такое же количество жидкости. Обозначим площадь сечения AB как S_1 , скорость течения жидкости через это сечение v_1 , соответственно площадь сечения CD обозначим S_2 и скорость v_2 .

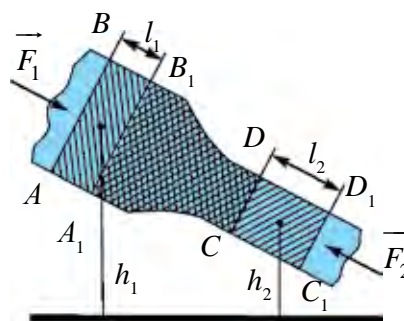


Рис. 4.18.

Сила давления $-F_1$ и F_2 . Под действием силы тяжести выделенный объем жидкости в течение времени t смещается в правую сторону. Выполненная при этом работа равна:

$$A = A_1 + A_2 = F_1 l_1 - F_2 l_2 = p_1 S_1 v_1 \Delta t + p_2 S_2 v_2 \Delta t.$$

При стационарном течении энергия жидкости в части $A_1 B_1$ и CD не меняется, т.е. жидкость, занимающая объем $ABB_1 A_1$, переносится и занимает объем $CDD_1 C_1$. Согласно закону сохранения энергии выполненная работа внешних сил равна изменению энергии:

$$\Delta E = \Delta E_k + \Delta E_p = \frac{1}{2} \rho \Delta V (v_2^2 - v_1^2) + \rho g (S_2 l_2 h_2 - S_1 l_1 h_1).$$

Учитывая, что $S_2 l_2 = S_1 l_1 = \Delta V$, сокращаем выражение на ΔV , получаем:

$$p_1 + \rho g h_1 + \frac{\rho v_1^2}{2} = p_2 + \rho g h_2 + \frac{\rho v_2^2}{2}. \quad (4.8)$$

Это выражение называется **уравнением Бернулли** для течения идеальной жидкости или газа.

Если $h_1 = h_2$ получаем

$$p_1 + \frac{\rho v_1^2}{2} = p_2 + \frac{\rho v_2^2}{2}.$$

Образец решения задачи.

Емкость имеет на дне маленькое отверстие закрытое пробкой. В емкость залили воду высотой 1 м. На поверхности воды установили поршень массой 1 кг и площадью 100 см². Через стенки емкости и поршня вода не просачивается. С какой скоростью будет выливаться вода, если резко открыть пробку?

Дано:
 $m = 1$ кг
 $S = 100$ см²
 $h = 1$ м
 Найти:
 $v = ?$

Решение:

Используем уравнение Бернулли. Давление потока воды равно давлению p_0 . Давление в нижней части на высоте h считая от отверстия равно: $p_0 + \frac{mg}{S}$. По уравнению Бернулли

$$p_0 + \frac{\rho v^2}{2} = p_0 + \rho g h + \frac{mg}{S}.$$

Отсюда: $v = \sqrt{2gh + \frac{2mg}{\rho S}} \approx 4,9$ м/с.

Ответ: 4,9 м/с.



1. Что такое динамическое давление жидкости?
2. Чем объясняются ламинарное и турбулентное течения?
3. Опишите течение воды в арках, речках рядом с вашим домом?
4. Почему при увеличении скорости течения жидкости уменьшается давление?

Тема 21. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В ТЕХНИКЕ ЗАВИСИМОСТИ ДАВЛЕНИЯ ОТ СКОРОСТИ ДВИГАЮЩИХСЯ ГАЗОВ И ЖИДКОСТЕЙ.

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 проведем следующий опыт. Возьмем два листа бумаги и зафиксируем их в вертикальном положении. Затем подуем в промежуток между листами (рис. 4.19). 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 счет 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.

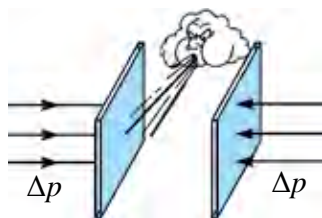


Рис. 4.19.

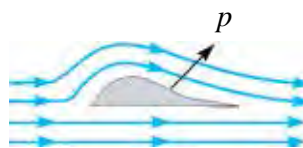


Рис. 4.20.

1. Сила, поднимающая крылья самолета. Полет самолетов тоже возможен благодаря этому явлению, на котором основано специальное устройство крыла (рис. 4.20). Крылья самолета имеют вогнутую форму для того, чтобы встречный поток воздуха обтекал крыло снизу и сверху. Путь, пройденный воздушным потоком сверху крыла, длиннее, чем путь, прой-

денный потоком снизу. Поэтому скорость потока воздуха над крылом больше, чем его скорость под крылом. Значит, давление p_1 в том месте, где скорость потока выше, меньше давления p_2 под крылом, где скорость потока меньше. В результате появляется разность давлений $p = p_1 - p_2$, направленная снизу вверх. Если поток будет турбулентным, разность давлений будет больше. В результате разницы этих давлений появляется сила, которая называется *подъемной силой крыла*.

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. Такое явление называется *эффектом Магнуса* (рис. 4.21).

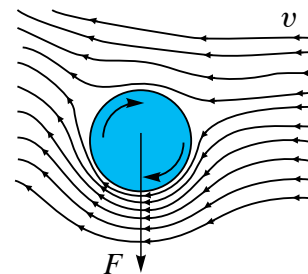


Рис. 4.21.

3. Расчет скорости воды, вытекающей из отверстия сосуда. Используя уравнение Бернулли, можно вычислить скорость вытекания жидкости из отверстия, находящегося на глубине h от поверхности жидкости (рис. 4.22).

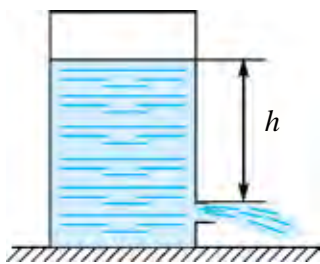


Рис. 4.22.

Давление на поверхности жидкости, которая находится в сосуде, равно давлению атмосферы p_0 . Скорость жидкости $v_0 = 0$. Давление жидкости перед отверстием тоже равно p_0 . Скорость жидкости, вытекающей из отверстия, обозначим v , и для этих двух случаев применим формулу:

$$p_0 + \frac{\rho v^2}{2} = p_0 + \rho gh, \quad (4.9)$$

отсюда получим:
$$v = \sqrt{2gh}. \quad (4.10)$$

Эта формула называется *формулой Торричелли* для идеальной жидкости.

Образец решения задачи.

В баке высотой 5 м, на высоте 50 см от земли установлен кран. С какой скоростью будет вытекать вода, если открыть кран?

<p>Дано:</p> <p>$H = 5 \text{ м}$ $h = 50 \text{ см} = 0,5 \text{ м}$</p> <hr/> <p>Найти:</p> <p>$v = ?$</p>	<p>Формула:</p> $v = \sqrt{2g(H - h)}$	<p>Решение:</p> $v = \sqrt{2 \cdot 10 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} (5 \text{ м} - 0,5 \text{ м})} =$ $= \sqrt{20 \frac{\text{м}^2}{\text{с}^2} 4,5} \approx 9,5 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ <p style="text-align: right;"><i>Ответ:</i> $\approx 9,5 \frac{\text{м}}{\text{с}}$</p>
--	--	--



1. Дома сделайте несколько видов воздушных змеев. Постарайтесь обосновать, какой из них имеет большую подъемную силу?

2. Попробуйте на уроках физкультуры пинать мяч с угла, поворачивая его.



1. Под воздействием какой силы воздушный змей поднимается вверх?

2. Зависит ли скорость вытекания воды от площади отверстия на рисунке 4.22?

3. Почему не изготавливают автомобили треугольной, четырехугольной и другой подобной формы?

4. В каких случаях можно применять эффект Магнуса?

Упражнение 3.

1. Возможно ли тянуть канат так, чтобы он не зависал?

2. Труба массой $1,2 \cdot 10^3 \text{ кг}$ лежит на земле. Сколько сил потребуется, чтобы поднять ее за один конец? (*Ответ:* $\approx 6 \cdot 10^3 \text{ Н}$).

3. Оси, на которых установлены колеса автомобиля массой $1,35 \text{ т}$, расположены на расстоянии 3 м друг от друга. Центр массы автомобиля находится на расстоянии $1,2 \text{ м}$ от передней оси. Определите силу тяжести, приложенную к каждой оси.

4. С какой силой нужно воздействовать на верхний край тела в форме куба, чтобы опрокинуть его? Каким должно быть минимальное значение коэффициента трения между кубом и полом? Сторона куба равна a , масса равна M .

5. Высокая доска, основание которой имеет форму квадрата, стоит на горизонтальной поверхности. Как можно определить коэффициент трения между доской и поверхностью, используя только линейку?

6. На тело действует три силы величиной по 100 Н. Если угол между первой и второй силами составляет 60 градусов, угол между второй и третьей силами составляет 90 градусов, найдите равнодействующую силу. (Ответ: 150 Н).

7. На веревке для сушки белья длиной 10 м висит костюм весом 20 Н. Прищепка, держащая костюм, находится в центре веревки и на 10 см ниже горизонтальной линии, соединяющей точки крепления веревки. Найдите силу натяжения веревки. (Ответ: 500 Н).

8. Может ли оставаться в таком положении ящик, который подвешен веревкой на вертикальной стене как показано на рисунке 4.23?

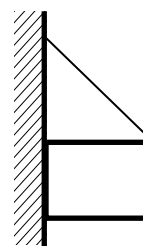


Рис. 4.23.

9. Рельс длиной 10 м массой 900 кг поднимается двумя параллельными тросами. Один из тросов закреплен на конце рельса, а второй закреплен на расстоянии 1 м от второго конца рельса. Найдите силы натяжения тросов. (Ответ: 4 кН; 5 кН).

10. Однородный металлический стержень согнули и подвесили свободно за один конец. Если металл был согнут под углом 90 градусов, то какой угол составляет подвешенный конец с вертикалью? (Ответ: $\text{tg}\alpha = 1/3$).

11. В каком месте реки скорость воды больше: на поверхности воды или на определенной глубине; на середине реки или ближе к берегу?

12. В системе подачи воды образовалось отверстие и вода начала брызгать вверх. Если площадь отверстия равна 4 мм², высота подъема струи воды составляет 80 см, определите, сколько воды израсходуется за сутки? (Ответ: 1380 л).

13. Подводная лодка плавает под водой на глубине 100 м. Во время учебной тренировки в ней открыли люк. Если диаметр люка равен 2 см, с какой скоростью вода будет затекать в лодку? Сколько воды затечет за час в подводную лодку через люк? Давление в лодке равно давлению атмосферы. (Ответ: 44,3 м/с; 50 м³).

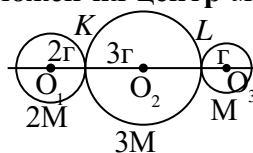
14. Расход воды в трубе, используемой для пожаротушения, составляет 60 л/мин. Если площадь воды, выходящей из трубы, равна 1,5 см², чему равна площадь воды на высоте 2 м?

15. Почему пуля, пущенная в вареное яйцо, проходит сквозь него, а попавшая в сырое яйцо разбивает его?

Тестовые вопросы по итогам главы IV.

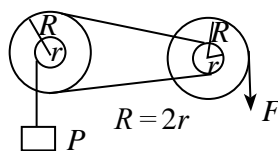
1. Шары, с массами $2M$, $3M$ и M установлены как показано на рисунке. В какой точке расположен их центр массы?

- A) между точками KL;
 B) в точке L;
 C) в точке M;
 D) между точками LM.



2. Система, изображенная на рисунке, находится в состоянии равновесия. Какой части R равна сила F ?

- A) $1/2$;
 B) $1/4$;
 C) $1/8$;
 D) 2.

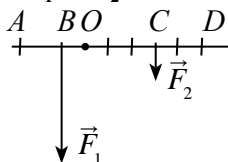


3. Плечо силы – это ...

- A) длина рычага;
 B) расстояние от оси вращения до конца рычага;
 C) самое короткое расстояние от направления вектора сил до оси вращения;
 D) самое короткое расстояние между парой сил, действующих на рычаг.

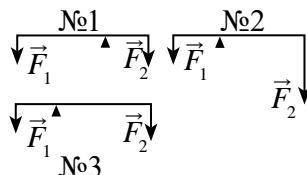
4. На рисунке приведены действующие на рычаг силы \vec{F}_1 и \vec{F}_2 . Покажите плечи сил \vec{F}_1 и \vec{F}_2 .

- A) OA; OD;
 B) BD; CA;
 C) AB; CD;
 D) OB; OC.



5. Какой из приведенных на рисунке рычагов находится в равновесии.

- A) Только 1;
 B) Только 2;
 C) Только 3;
 D) Только 1 и 3.



6. В каких единицах измеряется момент силы?

- A) Ньютон метр (Н · м);
 B) Джоуль (Дж);
 C) Ватт секунд (Вт · с);
 D) Джоуль/секунд (Дж/с).

7. «Модули скоростей несжимаемой жидкости, текущей по трубам с разными сечениями, обратно пропорциональны сечениям трубы». Как называется этот постулат?
 А) Уравнение непрерывности; В) Уравнение Торричелли;
 С) Уравнение Бернулли; Д) Правило Магнуса.
8. Покажите формулу Торричелли.
 А) $v = \sqrt{2gR}$; В) $v = \sqrt{gh}$;
 С) $v = \sqrt{2gh}$; Д) $p_1 + \rho g h_1 + \frac{\rho v_1^2}{2} = \text{const.}$
9. Покажите формулу Бернулли.
 А) $v = \sqrt{2gR}$; В) $v = \sqrt{gh}$;
 С) $v = \sqrt{2gh}$; Д) $p_1 + \rho g h_1 + \frac{\rho v_1^2}{2} = \text{const.}$
10. Под цистерной высотой 5 м установлен кран. С какой скоростью из нее будет вытекать жидкость, если открыть кран?
 А) 9,5 м/с; В) 95 см/с; С) 9,8 м/с; Д) 10 м/с.

Основные понятия, правила и законы, изученные в главе IV

Устойчивое равновесие	При выведении тела из положения равновесия возникают силы, возвращающие тело в прежнее положение. Это явление называется устойчивым равновесием.
Неустойчивое равновесие	При выведении тела из положения равновесия возникают силы, удаляющие его от положения равновесия. Такое равновесие называется неустойчивым равновесием.
Безразличное равновесие	Безразличным равновесием называется явление, при котором тело выводится из равновесного состояния и не появляется сила, изменяющая его состояние.
Момент силы	Произведение силы на плечо силы: $M = F \cdot l$
Условие равновесия тела, которое имеет ось вращения	Когда векторная сумма моментов сил, действующих на тело, равняется нулю, тело остается в равновесии: $\vec{M}_1 + \vec{M}_2 + \vec{M}_3 + \dots + \vec{M}_n = 0$.

Двухплечный рычаг	Опора находится между точками, к которым приложены силы.
Одноплечный рычаг	Опора расположена на одном конце рычага, а груз устанавливается на второй конец рычага
Степенной полиспаст	Комплекс подвижных и неподвижных блоков $F = \frac{P}{n}$ P – вес груза; F – сила тяги.
Ламинарное течение	Течение жидкости отдельными слоями
Турбулентное течение	Движение жидкости в виде воронки.
Уравнение непрерывности течения	Модули скоростей несжимаемой жидкости, текущей по трубам разного сечения, обратно пропорциональны сечениям трубы: $S_1 v_1 = S_2 v_2$.
Уравнение Бернулли	$p_1 + \rho g h_1 + \frac{\rho v_1^2}{2} = p_2 + \rho g h_2 + \frac{\rho v_2^2}{2}$ <p>В потоке жидкости давление велико, если скорость течения мала, и давление мало, если скорость велика.</p>
Динамическое давление	Давление, создаваемое в результате движения жидкости.
Эффект Магнуса	Изменение направления движения предмета в результате появления разницы давлений газа или жидкости по сторонам предмета, который совершает вращательное движение.
Формула Торричелли	$v = \sqrt{2gh}$; v – скорость течение воды; h – высота.

ГЛАВА V. МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

Тема 22. ГАРМОНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ

Некоторые движения, встречающиеся в быту, за равные промежутки времени повторяются. Такое движение называется периодическим движением. Часто встречается движение, при котором тело перемещается то в одну, то в другую сторону относительно равновесного состояния. Такое движение тела называется *колебательным движением* или просто *колебанием*.

Колебания, совершаемые телом, которое выведено из равновесного состояния в результате действия внутренних сил, называются *собственными (свободными) колебаниями*. Величина удаления от равновесного состояния колеблющегося тела называется его *смещением* (x). Самое большое отдаление от равновесного состояния называется *амплитудой колебания* (A).

Для наблюдения механических колебаний ознакомимся с колебаниями груза, закрепленного на конце пружины (рис. 5.1). На этом рисунке груз, закрепленный на пружине, сможет двигаться без трения с горизонтальным стержнем, так как силу тяжести шарика приводит в равновесие реакционная сила стержня.

Коэффициент упругости пружины – k , а ее масса ничтожна мала и можно ее не учитывать. Считаем, что масса системы сосредоточена в грузе, а упругость в пружине.

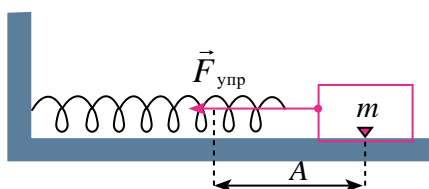


Рис. 5.1.

Если груз, который находится в равновесии, потянем вправо на расстояние A и отпустим, то под действием силы упругости, которая появляется в пружине, груз смещается в сторону равновесного состояния.

$$F_{\text{упр}} = -kA \quad (5.1)$$

С течением времени смещение груза уменьшается относительно A , но скорость груза при этом увеличивается. Когда груз доходит до равновесного состояния, его смещение (x) равняется нулю и соответственно сила упругости равняется нулю. Но груз по инерции начинает двигаться в левую сторону. Модуль силы упругости, которая появляется в пружине, тоже растёт. Однако из-за того, что сила упругости постоянно направлена против смещения груза, она начинает тормозить груз. В результате движение груза замедляется, и, в результате, прекращается. Теперь груз под воздействием эластической силы сжатой пружины начинает двигаться в сторону равновесного состояния.

Для определения закономерности изменения в течение времени системы, которая периодически совершает колебания, заполним воронку песком, подвесим на веревке, подложим бумагу под систему и раскачаем воронку. В ходе колебания начинаем равномерно вытягивать бумагу из-под системы. В результате мы увидим, что следы песка на бумаге образуют синусоиду. Из этого можно сделать следующий вывод: *смещение периодически колеблющегося тела по истечении времени изменяется по закону синусов и косинусов*. При этом самое большое значение смещения равняется амплитуде (A):

$$x = A \sin(\omega_0 t + \varphi_0), \quad (5.2)$$

здесь: ω_0 – циклическая частота, зависящая от параметров колеблющихся систем, φ_0 – начальная фаза, $(\omega_0 t + \varphi_0)$ фаза колебания с течением времени t .

Из математики известно, что $\sin \alpha = \cos\left(\alpha - \frac{\pi}{2}\right)$; (5.2)

поэтому формулу (5.2.) можно записать в виде

$$x = A \cos\left(\omega_0 t + \varphi_0 - \frac{\pi}{2}\right). \quad (5.3)$$

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

Значит, пружинный маятник, вышедший из равновесного состояния, совершает гармоническое колебание. Для того чтобы система совершала гармоническое колебание: 1) при выходе тела из равновесного состояния, для возвращения его в равновесное состояние должна появиться внутренняя сила; 2) колеблющееся тело должно обладать инертностью и на него не должны оказывать воздействие силы трения и сопротивления. Эти условия называется условиями проявления колебательных движений.

Основные параметры гармонических колебаний:

а) период колебания T – время одного полного колебания:

$$T = \frac{t}{N}; \quad (5.4)$$

б) частота колебания ν – количество колебаний, совершаемых за 1 секунду:

$$\nu = \frac{N}{t}; \quad (5.5)$$

Единица $[\nu] = c^{-1} = \text{герц}$;

с) циклическая частота ω – количество колебаний за 2π секунд:

$$\omega = \frac{2\pi}{T}. \quad (5.6)$$

С учетом формул (5.5) и (5.6) уравнение гармонических колебаний (5.2) можно записать в следующей форме.

$$x = A \sin(\omega_0 t + \varphi_0) = A \sin\left(\frac{2\pi}{T} t + \varphi_0\right) = A \sin(2\pi \nu t + \varphi_0). \quad (5.7)$$

Большинство величин, количественно описывающих гармонические колебания, смещения которых с течением времени меняются по закону синусов или косинусов (скорость, ускорение, кинетическая и потенциальная энергия), тоже гармонически меняются.

Это подтверждается следующими графиками и уравнениями:

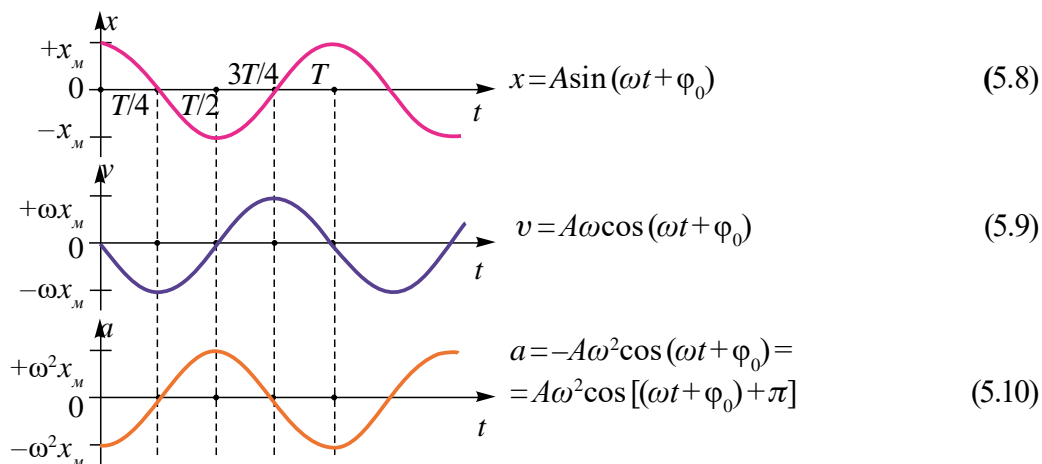


Рис. 5.2.

Образец решения задачи.

Точка совершает гармоническое колебательное движение. Максимальное смещение и скорость соответственно равны 0,05 м и 0,12 м/с. Найдите максимальное ускорение и скорость колебательного движения, а также ускорение точки в момент, когда смещение равно 0,03 м.

Дано:
 $A = 0,05 \text{ м}$
 $v_{\text{max}} = 0,12 \text{ м/с}$

Найти:

$a_{\text{max}} - ?$
 $v - ?$
 $a - ?$

Формула и решение:

$$x = A \sin(\omega t + \varphi), \quad a_{\text{max}} = \frac{v_{\text{max}}^2}{A};$$

$$v = v_{\text{max}} \sqrt{1 - \left(\frac{x}{A}\right)^2} = \frac{v_{\text{max}}}{A} \sqrt{A^2 - x^2}$$

$$v = \omega A \cos \omega t; \quad a = -\omega^2 A \sin \omega t = -\omega^2 x;$$

$$a = -\frac{v_{\text{max}}^2}{A^2} x = -\frac{(0,12)^2 \left(\frac{\text{м}}{\text{с}}\right)^2}{(0,05)^2} \cdot 0,03 = -(7,3 \cdot 10^{-2} \text{ м/с}^2)$$

$$a_{\text{max}} = \frac{(12)^2 \cdot 10^{-4} \left(\frac{\text{м}}{\text{с}}\right)^2}{5 \cdot 10^{-2}} = 29 \cdot 10^{-2} \text{ м/с}^2;$$

$$v = \frac{0,12 \frac{\text{м}}{\text{с}}}{0,05} = \sqrt{(0,05^2 - 0,03^2) \text{ м}^2} \approx 9,6 \cdot 10^{-2} \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$



1. Какое движение называется периодическим движением? Приведите примеры периодического движения из повседневной жизни и техники.

2. Напишите уравнение гармонического колебания.

3. Что называется смещением, амплитудой, периодом, частотой гармонического колебания?

Тема 23. ПРУЖИННЫЕ И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МАЯТНИКИ

Тело или система тел, совершающие периодические колебательные движения, называются **маятниками**. Большинство колебательных движений, встречающихся в природе, напоминают движение пружинных и математических маятников.

Система, состоящая из груза массой M , подвешенного на пружине с упругостью k , называется пружинным маятником (рис. 5.3). Под тяжестью подвешенного груза пружина растягивается на расстояние x_0 . Условие ее равновесия определяется выражением:

$$m\vec{a} = -kx_0 \quad (5.11)$$

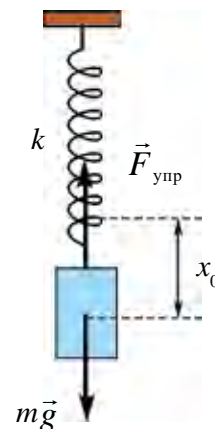


Рис. 5.3.

Если немножко растянуть пружину и отпустить, то груз придет в колебательное движение в вертикальном направлении.

С помощью опытов мы определили, что смещение груза в зависимости от времени изменяется следующим образом:

$$x = A \sin(\omega_0 t + \varphi_0)$$

Если учесть, что ускорение тела, совершающего гармонические колебания $a = -\omega_0^2 x$, то уравнение (5.10) примет вид:

$$-\omega_0^2 x + \frac{k}{m} x = 0.$$

Из этого уравнения мы имеем:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (5.12)$$

Значит, частота циклического колебания тела, совершающего гармоническое колебание, зависит от параметров тел, входящих в систему колебания. Формула (5.12) называется формулой для определения циклической (периодической) частоты пружинного маятника

$$T = \frac{1}{\nu} = \frac{2\pi}{2\pi\nu} = \frac{2\pi}{\omega_0}.$$

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{k}{m}}} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}},$$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}. \quad (5.13)$$

Период колебания пружинного маятника прямо пропорционален выведенному из-под квадратного корня значению массы груза и обратно пропорционален выведенному из-под квадратного корня значению упругости пружины.

Рассмотрим обмен энергиями в пружинном маятнике. Кинетическая энергия маятника, если не учитывать массу пружины, равна кинетической энергии груза, $E_k = \frac{mv^2}{2}$. В предыдущих темах было показано, что скорость можно выразить формулой $v = A\omega_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$. В таком случае кинетическая энергия маятника равна

$$E_k = \frac{1}{2} m A^2 \omega_0^2 \cos^2(\omega_0 t + \varphi_0) \quad (5.14)$$

Потенциальная энергия пружинного маятника равна энергии деформации пружины, т.е.:

$$E_{\text{п}} = \frac{kx^2}{2} = \frac{1}{2}kA^2 \sin^2(\omega_0 t + \varphi_0). \quad (5.15)$$

В большинстве случаев важно знать полную энергию системы:

$$E_{\text{общ}} = E_{\text{к}} + E_{\text{п}} = \frac{1}{2}mA^2\omega_0^2 \cos^2(\omega_0 t + \varphi_0) + \frac{1}{2}kA^2 \sin^2(\omega_0 t + \varphi_0)$$

Если учесть, что $\omega_0^2 = \frac{k}{m}$,

$$E_{\text{общ}} = \frac{1}{2}kA^2[\cos^2(\omega_0 t + \varphi_0) + \sin^2(\omega_0 t + \varphi_0)] \quad (5.16)$$

$$E_{\text{общ}} = \frac{1}{2}kA^2 = \text{const} \quad (5.17)$$

Обратите внимание, что полная энергия пружинного маятника является постоянной величиной, не зависящей от времени, т.е. соблюдается выполнение закона сохранения механической энергии.

Материальная точка, подвешенная на нерастяжимой и невесомой нити и совершающая периодическое колебательное движение вокруг равновесного состояния, называется математическим маятником.

Когда маятник находится в устойчивом равновесном состоянии, вес материальной точки ($P=mg$) уравнивает силу натяжения T (рис. 5.4), так как их модули равны и направлены по одной линии в противоположные стороны. Если наклонить маятник на угол α , силы mg и T не смогут уравновесить друг друга из-за взаимного расположения под углом. В результате сложения таких сил появится **возвращающая сила**, которая вернет маятник в равновесное состояние. Если отпустить маятник, то под воздействием возвращающей силы он начинает двигаться в сторону равновесного состояния.

Из рис. 5.4. видим, что:

$$F_{\text{возвр.}} = P \sin \alpha = mg \cdot \sin \alpha \quad (5.18)$$

Согласно второму закону Ньютона, сила F придает материальной точке ускорение a , поэтому

$$-mg \sin \alpha = ma. \quad (5.19)$$

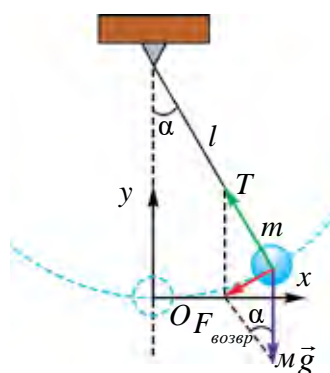


Рис. 5.4.

Из-за того, что угол наклона очень маленький ($\alpha \leq 6^\circ \div 8^\circ$), а сила F направлена противоположно смещению, формулу (5.19) можно записать в виде

$$ma \approx -mg \cdot \frac{x}{l} \quad (5.20)$$

Если смещение материальной точки (шарика) во время колебательного процесса отметить буквой x и учитывать соотношение $a = -\omega_0^2 x$, получим $-m\omega_0^2 x = mg \frac{x}{l}$.

Следовательно
$$\omega_0 = \sqrt{\frac{g}{l}}. \quad (5.21)$$

Исходя из смысла периода колебания и учитывая, что $T = \frac{1}{\nu} = \frac{2\pi}{2\pi\nu} = \frac{2\pi}{\omega_0}$

получаем
$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}. \quad (5.22)$$

Эта формула, определяющая период колебания математического маятника, называется **формулой Гюйгенса**. Отсюда вытекают следующие законы математического маятника:

1) при маленьких углах наклона (α) математического маятника, его период колебания не зависит от амплитуды колебания.

2) период колебания математического маятника также не зависит от массы подвешенного на него груза;

3) период колебания математического маятника прямо пропорционален выведенному из-под квадратного корня значению длины маятника и обратно пропорционален выведенному из-под квадратного корня значению ускорения свободного падения.

Отсюда колебание математического маятника записывается следующим выражением:

$$x = A \sin(\omega_0 t + \varphi_0).$$

Следует отметить, что когда амплитуда колебания или угол наклона велики, колебания математического маятника не являются гармоническим.

В этом случае нельзя считать $\sin \alpha \approx \frac{x}{l}$ и для решения уравнения движения не применяется закон синусов или косинусов.

Образец решения задачи:

Период колебания первого маятника равен 3 сек, второго—4 сек. Найдите период колебания маятника с длиной, равной сумме длин этих маятников.

<p>Дано:</p> $T_1 = 3 \text{ с}$ $T_2 = 4 \text{ с}$ $l = l_1 + l_2$	<p>Формула:</p> $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}; T_1 = 2\pi\sqrt{\frac{l_1}{g}}; T_2 = 2\pi\sqrt{\frac{l_2}{g}};$ $T = 2\pi\sqrt{\frac{l_1+l_2}{g}} \cdot l_1 = \frac{T_1^2 \cdot g}{4\pi^2}$ и $l_2 = \frac{T_2^2 \cdot g}{4\pi^2}; T = \sqrt{T_1^2 + T_2^2}$	<p>Решение:</p> $T = \sqrt{3^2 + 4^2} = 5 \text{ с.}$ <p>Ответ: 5 сек.</p>
<p>Найти:</p> $T - ?$		



1. Во сколько раз должны измениться параметры пружинного маятника, чтобы в два раза увеличилась его циклическая частота?
2. По какому закону меняется угол наклона нити, на которой подвешен математический маятник?
3. При выполнении какого условия колебание математического маятника будет гармоническим?

Тема 24. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА: ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСКОРЕНИЯ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МАЯТНИКА

Цель работы: Изучение метода определения ускорения свободного падения с помощью математического маятника.

Необходимые приборы и принадлежности. Математический маятник, универсальный лабораторный штатив, секундомер, мерные ленты.

Порядок выполнения работы:

1. Ленту с шаром закрепляем на штативе. Измеряем ее длину. Определяем радиус шара r . Полученные результаты записываем в таблицу.
 $l_1 = (l_n + r) \cdot m.$

2. Шарик отклоняем в положение под небольшим углом (6–8 градусов) от состояния равновесия и приводим в движение. Одновременно включаем секундомер.

3. Считаем количество колебаний математического маятника. Засекаем показание секундомера, когда маятник совершит $N_1 = 20$ колебательных движений.

4. Показания секундомера заносим в таблицу.

5. По формуле $T = \frac{t}{n}$ определяем период колебания.

6. Вычисляем ускорение свободного падения по формуле $g = \frac{4\pi^2 l}{T^2}$.

7. Не меняя длину нити маятника, повторяем опыт для случаев с количеством колебаний $N_2=30$ и $N_3=40$.

8. На основе полученных результатов определяем значение периода колебаний маятника и ускорения свободного падения. Их значения записываем в таблицу.

9. На основе полученных результатов заполняем следующую таблицу.

$t_i,$ с	$l_i,$ м	N_i	$t_i,$ с	$g_i,$ м/с ²	$\bar{g},$ м/с ²	$\Delta g,$ м/с ²	$\Delta \bar{g},$ м/с ²	$\varepsilon = \frac{\Delta \bar{g}}{\bar{g}} \cdot 100\%$
		20						
		30						
		40						



1. Почему период колебания маятника не зависит от массы шарика маятника?
2. Почему при проведении этого опыта на разных географических широтах получаются разные результаты?
3. Как меняется период колебания с изменением размеров шарика математического маятника?

Тема 25. ВЫНУЖДЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ. РЕЗОНАНС В ТЕХНИКЕ

Происходящие в какой-либо среде свободные колебания являются затухающими (рис. 5.5), потому что колеблющееся тело в период колебания встречает сопротивление со стороны среды в результате трения.

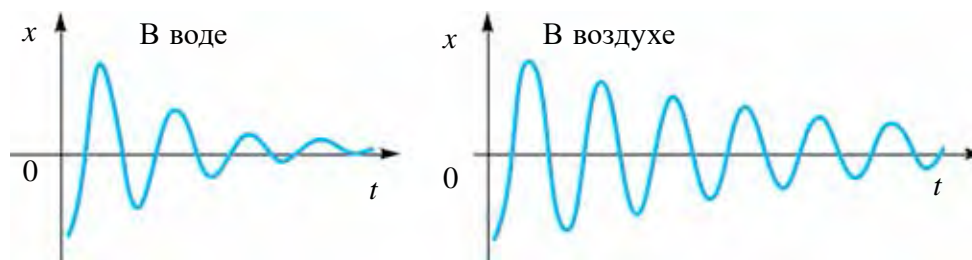


Рис. 5.5.

По этой причине свободными колебаниями на практике не пользуются.

Чтобы колебания не затухали, требуется периодически пополнять использованную энергию. Для этого на колеблющуюся систему нужно периодически воздействовать с помощью внешних сил. Простой макет такого оборудования, где со стороны действует внешняя сила, приводится на рисунке 5.6. Если груз, подвешенный на пружине, потянуть и отпустить, то он будет колебаться. Если в это время крутить ручку железной оси, к которой подвешена пружина, то колебания не угаснут. **Колебания системы, которые происходят под периодическим воздействием внешних сил, называются вынужденными колебаниями.**

Периодически меняющаяся внешняя сила, которая создает эти вынужденные колебания, называется **вынуждающей силой**.

Можно привести множество примеров вынужденных колебаний из повседневной жизни. Мембраны радиодинамиков ваших любимых радиоприемников, магнитофонов, телевизоров колеблются под воздействием проходящего через них вынуждающего тока. Когда рядом с домом или классом проезжают большегрузные автомобили, то вы слышите, как дребезжат стекла. Пневматические молотки (отбойные молотки), с помощью которых ломают бетонные конструкции (фундамент, столбы), рушат горные породы, тоже работают под воздействием периодических внешних сил. Чтобы воспользоваться вынужденными колебаниями или избавиться от них, нужно изучить это явление. С помощью оборудования, приведенного на рисунке 5.6, рассмотрим воздействие внешних вынуждающих сил на колебания, происходящие в колебательной системе.

Пружина (3) с подвешенным грузом (4) висит на крючке (2). Кончик крючка имеет форму кольца, и может скользить по металлической оси (1), согнутой в виде дуги. Когда ось начинает вращаться под воздействием внешней силы, колебания груза сначала немножко отстают, а затем совпадают с вращением оси. **Колебание становится устойчивым.**

Сколько раз за единицу времени будет вращаться ось, столько же раз будет колебаться пружина с грузом.

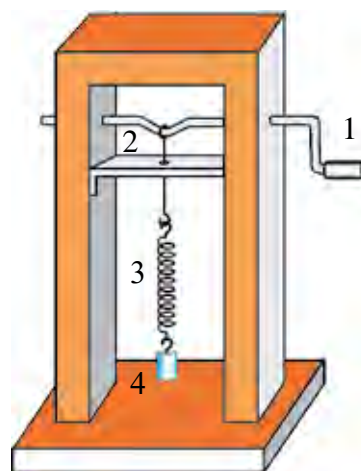


Рис. 5.6.

Значит, **частота вынужденных колебаний, происходящих в колебательных системах, равна частоте вынуждающих сил.**

Вынужденные колебания – это колебания, которые не затухают.

Явление резонанса.

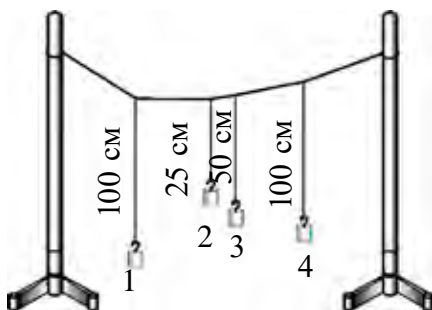


Рис. 5.7.

Теперь посмотрим, каким образом влияет амплитуда колебаний, происходящих в колебательной системе, на вынуждающую силу. Для этого проведем простой опыт. Веревку длиной 4–5 метров протянем из одного конца комнаты в другой с небольшим провисанием.

К этой веревке подвесим 3–4 груза на лентах разной длины (рис. 5.7).

Выберем для первого и четвертого груза ленты одинаковой длины. Если первый маятник вывести из равновесного состояния и отпустить, то он начинает колебаться. Его колебания, передаваясь по общей веревке, приводят в движение остальные маятники. После установления устойчивых колебаний второго, третьего и четвертого маятников, можно убедиться, что амплитуда четвертого маятника окажется самой большой. Из-за того, что длина четвертого и первого маятников одинаковы, их периоды свободного колебания (частота) получаются взаимно равными.

Значит, в вынужденных колебаниях в случае, когда частота вынуждающей силы равна частоте собственного колебания колебательной системы, амплитуда колебаний будет самой большой, т.е. происходит резонанс.

Явление резкого увеличения амплитуды колебания в случае, когда частота внешней вынуждающей силы равняется собственной частоте колебательной системы, называется резонансом.

Причиной резкого увеличения амплитуды во время резонанса является взаимное совпадение направления вынуждающей силы и направления движения колеблющегося тела.

Резонанс широко используется в технике и в быту. В часах, во всех видах звонков, сиренах, пневматических молотках используют явление резонанса.

Однако явления резонанса не всегда полезны.

Например, когда человек проходит по висячему мосту через реку, он качается. В зависимости от скорости, с которой человек проходит по мосту (быстро или медленно), колебания моста могут увеличиваться или уменьшаться. Если частота шага совпадает с собственной частотой моста, его опоры могут не выдержать и трос или канат может оборваться.

В тех случаях, когда резонанс наносит вред, в целях уменьшения воздействия предпринимают соответствующие меры. Фундаменты производственных помещений строят тяжелыми и большими, чтобы в результате вращения деталей оборудования не возникал резонанс. Для быстрого погашения колебаний в автомобилях устанавливаются *амортизаторы*.

Автоколебания. Для того, чтобы вынужденные колебания не затухали, нужна внешняя периодическая сила. Но колебания системы могут быть негаснущими и без воздействия внешних периодических сил. Если внутри свободно колеблющейся системы будет иметься источник энергии, и система сможет направлять необходимую энергию из этого источника к колеблющемуся телу, чтобы восполнять затраченную энергию, то в такой системе появляются негаснущие колебания.

Самым простым примером системы такого типа являются обычные часы с маятником. Эта система имеет определенный запас энергии, т.е. потенциальную энергию поднятого на определенную высоту груза или энергию сжатой пружины.

Системы, которые создают негаснущие колебания за счет снабжения из источника энергии, называются автоколебательными системами. Электрический звонок, сердце и легкие человека тоже можно рассматривать как автоколебательные системы.

Негаснущие колебания, которые могут осуществляться в системе под воздействием внутреннего источника и без воздействия внешней периодической силы, называются автоколебаниями.

Частота вынужденного колебания будет совпадать с частотой внешних сил. Частота и амплитуда автоколебаний определяются собственными особенностями системы. Амплитуда автоколебаний не зависит от величины кратковременного воздействия (удара), которое привело к этим колебаниям.



- 1. Что надо сделать, чтобы свободные колебания превратились в негаснущие колебания?*
- 2. Какие колебания называются вынужденными колебаниями?*

3. При каких условиях возникает явление резонанса?

4. Приведите примеры полезного или вредного воздействия резонанса.



Возьмите мяч, играйте как баскетболисты, ударяя по земле. К какому виду движения можно отнести движение мяча? Измените частоту ударов по земле и высоту подъема мяча. Обратите внимание на тот момент, когда движение мяча станет устойчивым.

Тема 26. РАСПРОСТРАНЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЛН В СРЕДАХ. ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УЛЬТРА-И ИНФРАЗВУКОВ В БЫТУ И ТЕХНИКЕ

Нам известно, что колебательное движение тела передается в среде, где находится это тело. Если колебания происходят в воздухе, то движение передается частицам воздуха. Колебательные движения частиц воздуха распространяются во всех направлениях. Это происходит и в жидкостях, и в твердых телах. В вакууме механические волны не распространяются.

Процесс распространения колебаний в среде по времени называется **волной**.

Механические волны бывают двух видов: продольные и поперечные волны. Если направление колебаний частиц в среде, где распространяется волна, находится на одной оси с направлением распространения волн, такая волна называется **продольной волной**.

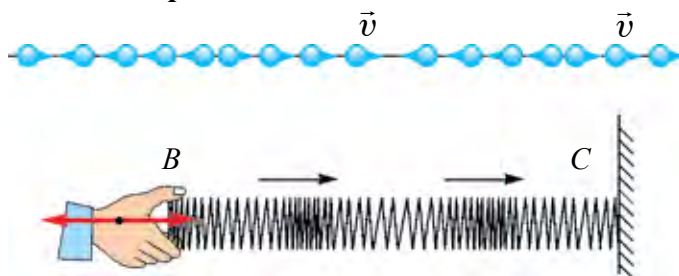


Рис. 5.8.

При распространении продольных волн среда подвергается деформации сжатия и расширения (рис 5.8). Такие деформации в жидкостях и газах происходят путем уплотнения или разреживания частиц среды. Продольные волны могут распространяться во всех средах: в твердых, жидких и газообразных.

В качестве примера продольных волн можно привести волну на эластичном стержне или звук, распространяющийся по воздуху.

Если направление колебаний частиц в среде, где распространяется волна, будет перпендикулярным к направлению распространения волн, такая волна называется *поперечной волной*.

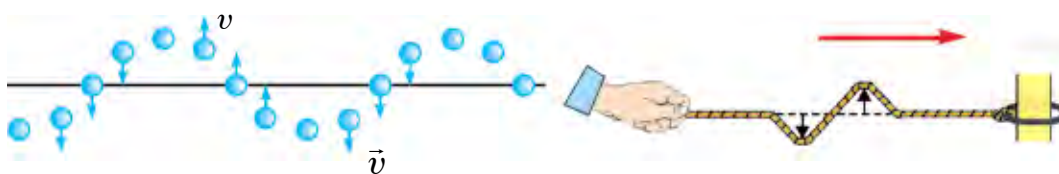


Рис. 5.9.

При распространении поперечных волн один слой среды смещается относительно второго и в среде появляются холмы и ямы (рис. 5.9). В отличие от твердых тел, жидкости и газы не обладают свойствами эластичности относительно смещений слоев, поэтому поперечные волны могут распространяться только в твердых телах.

Подробно рассмотрим процесс передачи колебаний от точки к точке поперечной волны. На рисунке 5.10 приводится состояние поперечной волны в каждую $\frac{1}{4} T$ времени.

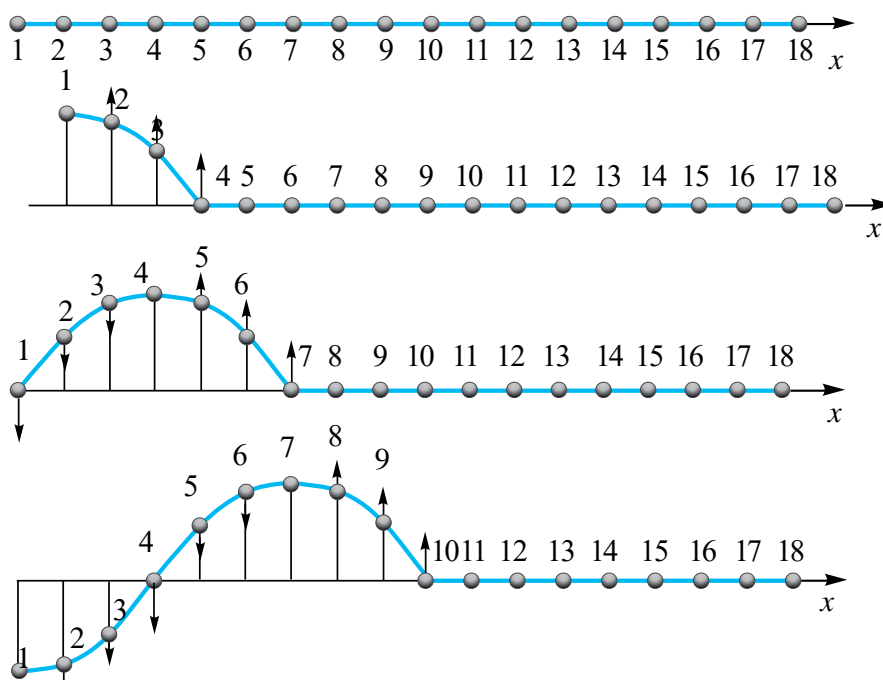


Рис. 5.10.

Состояние частиц в какой-либо момент времени на рисунке 5.10 дается в виде пронумерованных шариков. Благодаря близкому расположению шариков относительно друг друга среди них происходит взаимодействие. Если первый шарик привести в колебательное движение, т.е. если его заставить двигаться вверх и вниз, остальные шарики тоже будут повторять его движения. Однако их движение будет немного запаздывать относительно предыдущих шариков (смещено по фазе).

Например, четвертый шарик будет позади относительно первого шарика на $\frac{1}{4}$ колебания. Движение седьмого шарика отстает от первого шарика на $\frac{1}{2}$ колебания, десятый шарик на $\frac{3}{4}$ колебания. Тринадцатый шарик будет отставать от первого шарика на одно целое колебание, т.е. будет колебаться с ним в одной фазе.

Расстояние между точками, расположенными в двух самых близких промежутках и колеблющихся в одинаковых фазах, называют длиной волны.

Длина волны отмечается греческой буквой λ («лямбда»). Расстояние между первым и тринадцатым шариком, вторым и четырнадцатым шариком, третьим и пятнадцатым шариком считается равным длине одной волны.

Значит, расстояние распространения волны за один период равно длине волны:

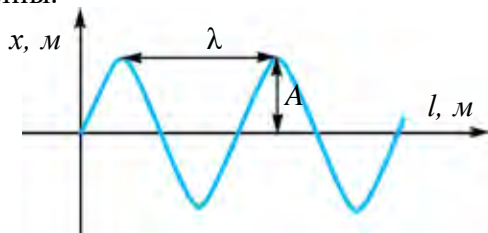


Рис. 5.11.

$$\lambda = vT.$$

Здесь v – скорость распространения волны (рис 5.11). Если учесть, что период колебания зависит от частоты $\nu = \frac{1}{T}$, соответственно,

$\lambda = \frac{v}{\nu}$. Единица измерения $[\lambda] = 1 \text{ м}$.

Если в воду бросить камень, то из точки его падения во все стороны начнут распространяться колебания. Эти волны имеют форму круга и состоят из холмов и ям.

Распространение колебаний по струне является примером простых волн.

Скорость распространения колебаний по струне $v = \sqrt{\frac{T}{\rho}}$ и поэтому:

а) скорость распространения зависит от силы натяжения струны T и ее линейной плотности $\rho = \frac{m}{l}$;

б) чем больше упругость среды, тем больше скорость распространения колебаний.

Звук и его природа. Если частота волны, которая распространяется в упругой среде, составляет от 20 Гц (по некоторым данным от 16 или 17 Гц) до 20 000 Гц, органы слуха человека могут улавливать такие механические волны. Эти волны называются *звуковыми волнами* или *звуком*. Волны с частотой меньше чем 20 Гц называются инфразвуком, и его человек не слышит.

Раздел физики, который изучает свойства волн с частотой от 1 Гц до 10^{13} Гц, называется *акустикой*.

Звук является продольной волной и распространяется со скоростью, зависящей от плотности среды и ее свойств.

Следует отметить, что при постоянной температуре среды изменение давления прямо пропорционально изменению плотности, и так как $\frac{p}{\rho} = \text{const}$, скорость распространения звука в газах не зависит от давления. Но скорость распространения звука в газе зависит от температуры газа.

В твердых телах распространяются и продольные, и поперечные волны, поэтому продольная скорость звука вычисляется формулой $v_{\text{прод.}} = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$, а скорость распространения поперечной волны вычисляется формулой $v_{\text{попереч.}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$.

Здесь E – модуль Юнга для среды, G – модуль смещения. В твердых телах скорость распространения продольных волн в два раза больше, чем скорости распространения поперечных волн, так как $E > G$.

Так как из эпицентра землетрясения до места, где мы находимся, продольные волны приходят раньше, а поперечные волны приходят с опозданием, мы ощущаем землетрясение два раза.

Человеческое ухо в состоянии чувствовать и слышать звук с частотой от 16 Гц до 20000 Гц.

Звуковые волны, имеющие частоту выше 20 кГц, называются ультразвуком. Ультразвук имеет особенные свойства, в частности он, подобно световым лучам, распространяется в среде в виде тонкого луча. Ультразвук широко применяется в следующих целях:

1) для поиска трещин в металлических конструкциях, предметов под водой, в т.ч. для поиска косяков морских рыб;

2) для изучения физических свойств твердых, жидких и газообразных тел;

3) для механической обработки очень твердых и хрупких тел, для их очистки;

4) в медицине для контроля беременности, изучения почек, печени и других внутренних органов человека.

Летучие мыши умеют испускать ультразвук и улавливают его отражение от препятствий, таким образом они ориентируются в пространстве, обнаруживают препятствия и облетают их.



1. Чем отличаются друг от друга продольные и поперечные волны?

2. Какой деформации подвергается среда при распространении продольных волн?

3. Как можно определить длину волны?

Упражнение 5.

1. Математический маятник за 1 мин 40 сек колеблется 50 раз. Определите период колебания и циклическую частоту маятника. (Ответ: 2 с, $\pi \frac{1}{с}$).

2. Уравнение колебательного движения дано в виде $x=0,06\cos 100\pi t$. Найдите амплитуду, частоту и период колебательного движения. (Ответ: 6 см, 50 Гц, 20 мс).

3. Точка совершает гармоническое колебательное движение. Самое большое смещение $A=10$ см, самая большая величина скорости $v_m=20$ см/с. Найдите циклическую частоту колебаний и максимальное ускорение точки. (Ответ: 2 рад/с; 0,4 м/с²).

4. Точка совершает гармоническое колебательное движение с амплитудой $A=0,1$ м, периодом $T=2$ с. Найдите скорость и ускорение в момент, при котором смещение $x=0,06$ м. (Ответ: 0,25 м/с; 0,6 м/с²)

5. В какой части периода скорость точки будет равна половине его максимального значения? Начальная фаза гармонического колебания равна нулю. (Ответ: $\frac{1}{12} T$).

6. Материальная точка совершает гармоническое колебательное движение с амплитудой $A=5$ см. Если на точку действует сила

упругости $\Gamma=0,2$ Н, найдите кинетическую, потенциальную и полную энергию.

7. Найти частоту колебания пружинного маятника, имеющего коэффициент упругости, равную 100 Н/м и массу груза 10 г? (Ответ: 16 Гц).

8. Как изменится частота колебания, если отрезать половину пружины пружинного маятника?

9. Длина математического маятника 2,5 м, масса шарика, подвешенного к нему, 100 г. Найдите период колебания. (Ответ: 3,14 с).

10. Ведро с водой, имеющее в днище маленькое отверстие, подвешено на веревке и раскачивается. Как будет меняться период колебания с уменьшением количества воды?

11. За одинаковые промежутки времени первый маятник совершил 50 колебательных движений, а второй маятник 30. Найдите длину маятников, если один маятник короче второго на 32 см.

12. Ученик весом 20 кг качается на качелях. Максимальный наклон качели от равновесного состояния 1 м. В течение 1 мин качели совершают 15 колебательных движений. Найдите кинетическую и потенциальную энергию за $1/12$ части периода колебания.

Тестовые вопросы по итогам главы V

1. Как изменится период, если амплитуду колебания увеличить в два раза?

- А) увеличится в 2 раза; В) уменьшится в 2 раза;
С) увеличится в 4 раза; Д) не изменится.

2. Как изменится период свободного (собственного) колебания, если длину математического маятника уменьшить в 16 раз?

- А) уменьшится в 16 раз; В) увеличится в 16 раз;
С) увеличится в 4 раза; Д) уменьшится в 4 раза.

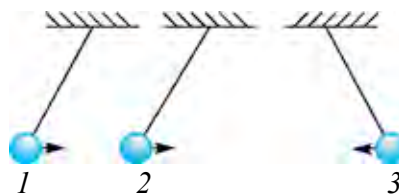
3. В каких фазах относительно друг друга колеблются шарики?

А) 1 и 3 в противоположных, 2 и 3 в одинаковых фазах;

В) 1 и 2 в противоположных, 2 и 3 в одинаковых;

С) 1 и 2 в одинаковых, 2 и 3 в противоположных;

Д) 1 и 2 в противоположных, 1 и 3 в одинаковых.



4. В каких средах могут распространяться продольные волны? .
 А) только в твердых телах; В) только в жидкостях;
 С) только в газах; Д) во всех средах.
5. Закончите предложение. Расстояние между точками, колеблющимися в одинаковых фазах в среде распространения колебаний, называется
 А) ... амплитудой колебания;
 В) ... длиной волны;
 С) ... частотой колебания;
 Д) ... период колебания.
6. Закончите предложение. Поперечные волны это волны
 А)... сжатия; В) расширения;
 С)... сжатия-расширения; Д) смещения.
7. Если период распространения волны 10 сек, длина волны 5 м, чему равна скорость распространения волны?
 А) 0,5 м/с; В) 2 м/с; С) 50 м/с; Д) 5 м/с.
8. Какое расстояние (см) материальная точка проходит за одно полное колебание, если амплитуда ее колебаний равна 4 см?
 А) 0; В) 4; С) 8; Д) 16.
9. Что называется циклической частотой?
 А) количество колебаний за 1 секунду;
 В) время, необходимое для одного колебания;
 С) количество колебаний за 2π секунды;
 Д) изменения угловой скорости за 1 секунду.
10. К пружине с коэффициентом упругости 160 Н/м подвесили груз массой 400 г. Чему равняется частота колебания (Гц) полученного маятника?
 А) 1,6; В) 3,2; С) 5,4; Д) 20.

**Основные понятия, правила и законы,
изученные в главе V**

Колебательные движения	Любые повторяющиеся движения
Период колебания	Время, необходимое для одного полного колебания. $T=1$ сек

Свободные колебания	Колебания, которые происходят за счет переданной первоначальной энергии.
Смещение колеблющегося тела	Величина, показывающая местоположение колеблющегося тела в любой момент времени относительно равновесного состояния.
Частота колебания	Количество колебаний за единицу времени $\nu = 1/T$; $[\nu] = 1/c = 1 \text{ Гц}$.
Пружинный маятник	Система, состоящая из пружины с коэффициентом упругости k и подвешенным к ней грузом массой m , которая может свободно колебаться: $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$
Математический маятник	Колеблющаяся система, состоящая из маленького шарика, закрепленного на нерастяжимой и невесомой нити, размеры которого намного меньше длины нити. $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$.
Затухающие колебания	Колебания, амплитуда которых уменьшаются с течением времени. Свободные колебания – это затухающие колебания.
Резонанс	Резкое увеличение амплитуды колебаний, когда частота внешней вынуждающей силы равняется частоте свободных (собственных) колебаний колеблющейся системы.
Продольные волны	Волны, при которых направление колебаний частиц в среде их распространения находится на одной оси с направлением распространения волн. Они распространяются в твердых, жидких и газообразных средах.
Поперечные волны	Волны, при которых направление колебаний частиц в среде их распространения перпендикулярно к направлению распространения волн. Они распространяются только в твердых телах.
Длина волны	Расстояние, преодолеваемое волной за один период: $\lambda = \nu T$. Единица $[\lambda] = 1 \text{ м}$.

ГЛАВА VI. ОСНОВЫ ТЕРМОДИНАМИКИ

Тема 27. НЕОБРАТИМОСТЬ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ. ЗАКОНЫ ТЕРМОДИНАМИКИ

В термодинамическом процессе система переходит из начального состояния в конечное через промежуточные состояния.

Обратимым процессом называется процесс, который может проходить как в прямом, так и в обратном направлении, проходя через одинаковые промежуточные состояния.

Например, все чистые механические процессы, которые проходят без трения, считаются примерами обратимого процесса. В частности, колебания тяжелого маятника, подвешенного на длинном крючке, будут близки к обратимому процессу. В этом случае кинетическая энергия практически полностью превращается в потенциальную энергию, то же самое происходит и в обратном порядке. Из-за того, что сопротивление среды мало, амплитуда колебания угасает медленно и процесс колебания продолжается долго.

Любые процессы, которые подвержены сопротивлению или передают тепло от горячего тела к холодному, необратимы. На практике все реальные процессы являются необратимыми процессами.

Процесс, описанный в примере с маятником, тоже является необратимым, так как невозможно полностью избавиться от трения. Поэтому часть механической энергии практически всегда превращается в тепло и безвозвратно расходуется в окружающую среду, т.е. в окружающих предметах происходят изменения, поэтому процесс называется необратимым.

Процесс передачи тепла от теплого тела к холодному тоже является примером необратимого процесса.

В целом в природе не существует обратимых процессов. Реальные процессы все считаются необратимыми. Обратимые процессы – это идеализированное понятие.

Внутренняя энергия. Вам известно, что термодинамическая система состоит из множества молекул и атомов. Система обладает внутренней

энергий из-за того, что молекулы всегда находятся в движении, т.е. система обладает кинетической энергией. Вместе с этим, из-за существования силы взаимодействия между молекулами вещества, у молекул имеется потенциальная энергия взаимного действия.

Сумма кинетической энергии беспорядочного движения всех молекул и потенциальной энергии их взаимодействий называется внутренней энергией термодинамической системы.

Не нужно путать внутреннюю энергию тела с механической энергией. Если механическая энергия тела зависит от движения и расположения тела относительно других тел, то внутренняя энергия тела зависит от движения и расположения относительно друг друга частиц, составляющих это тело.

Внутренняя энергия является однозначной функцией термодинамической системы, т.е. каждому состоянию системы соответствует определенное значение внутренней энергии, которое абсолютно не зависит от того, каким образом система пришла в это состояние. Если газ нагреть, скорости молекул и атомов возрастут. Это приведет к росту внутренней энергии. Если изменится давление или удельный объем, то это тоже приведет к изменению внутренней энергии, так как изменится расстояние между молекулами. Значит, потенциальная энергия их взаимодействия тоже изменится.

Обычно внутренняя энергия системы при $T=0$ К считается равной нулю, но это не имеет принципиального значения, так как при переходе системы из одного состояния в другое будет иметь значение изменение внутренней энергии ΔU .

Первый закон термодинамики. Рассмотрим пример нагревающегося чайника. Количество тепла Q , получаемое чайником, расходуется на согревание воды, т.е. на рост внутренней энергии воды ΔU и выполняемую работу A , совершенную против внешних сил (сила тяжести крышки) при подъеме крышки чайника парами воды. Закон сохранения и превращения энергии для этого процесса имеет вид:

$$Q = \Delta U + A \quad (6.1)$$

Это математическое выражение первого закона термодинамики.

Количество тепла, переданное термодинамической системе, равно сумме роста ее внутренней энергии и выполненной работе против внешних сил.

Если в систему передается количество тепла, Q будет иметь положительный знак, если количество тепла расходуется из системы, Q будет иметь отрицательный знак. То же самое для работы, если система совершает работу против внешних сил, работа A – положительная, если внешние силы совершают работу над системой, то работа A будет отрицательной.

Первый закон термодинамики показывает, что создать вечный двигатель первого рода (на латыни «perpetuum mobile») невозможно. Согласно определению, «perpetuum mobile» первого рода – это непрерывно действующая машина, которая, будучи запущенной один раз, совершает работу без получения энергии извне. В первом же законе термодинамики, который является законом сохранения и превращения энергии, записано, что во всех процессах, встречающихся в природе, энергия сама по себе ниоткуда не появляется и никуда не исчезает, она может только превращаться из одного вида в другой. Первый закон термодинамики можно записать следующим образом:

Изменение внутренней энергии при переходе системы из одного состояния в другое равно сумме работы внешних сил (A') и количества тепла, переданного системе:

$$\Delta U = Q + A'. \quad (6.2)$$

Хотя первый закон термодинамики описывает закон сохранения и превращения энергии, он не может показать направление прохождения термодинамических процессов. Например, первый закон может показать возможность перехода тепла от горячего тела к холодному, а также возможность перехода от холодного тела к горячему. При этом возникает вопрос: «Какие процессы в природе могут совершаться сами по себе?». На это может ответить второй закон термодинамики.

Второй закон термодинамики. Имеется несколько видов описаний этого закона, самый простой из них – описание Клаузиуса.

|| **Тепло не переходит от тела с низкой температурой к телу с высокой температурой.**

На практике тепло воды бесконечного океана может переходить само по себе к телу с более низкой относительно воды температурой. Для того чтобы передать тепло от тела с низкой температурой к телу с высокой температурой, нужно выполнить дополнительную работу. Но количество тепла не полностью расходуется на работу, часть его уходит на нагревание окружающих предметов. С этой точки зрения второй закон термодинамики

в интерпретации Планка звучит следующим образом: **в природе не существует процессов, в которых количество тепла полностью превращается в работу.**

Для того чтобы тепло превратилось в работу, нужны нагреватель и охладитель. В любых тепловых машинах только определенная часть передаваемой от нагревателя в охладитель энергии превращается в полезную работу. Возникает вопрос: «От каких величин зависит КПД тепловых машин и что нужно сделать, чтобы его увеличить?» На этот вопрос может ответить второй закон термодинамики в интерпретации Карно: **Коэффициент полезного действия идеальной тепловой машины определяется только разницей температур, передающих тепло и принимающих тепло.**

Законы термодинамики дают представление о том, какие тепловые машины возможно создать и на что нужно обратить внимание, чтобы увеличить их КПД.

Второй вид «perpetuum mobile». Второй вид «perpetuum mobile» основан на идее возможности использования энергии в большом количестве в водах океана без выполнения работы. А второй закон термодинамики утверждает, что без помощи может переходить тепло от горячего тела к холодному, для обратного процесса необходимо выполнить дополнительную работу. Из этого следует, что «perpetuum mobile» второго вида создать невозможно.

Если бы получилось создать «perpetuum mobile» второго рода, человечество обладало бы безграничным источником энергии. Если бы удалось понизить на 1°C температуру воды океана массой 10^{21} кг, то при этом выделилась бы тепловая энергия в количестве 10^{24} Дж. Если уголь, дающий такую же энергию, погрузить в железнодорожный состав, то длина состава будет равна 10^{10} км. Это расстояние почти равно диаметру солнечной системы.



- 1. Может ли первый закон термодинамики показать направление прохождения процесса?*
- 2. Какие интерпретации второго закона термодинамики вы знаете?*
- 3. В чем значение второго закона термодинамики?*
- 4. Может ли существовать в природе процесс, при котором количество тепла полностью переходит в работу?*
- 5. От чего зависит коэффициент полезного действия тепловых машин?*

Тема 28. АДИАБАТИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС. КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ ТЕПЛОВЫХ МАШИН. ЦИКЛ КАРНО

Адиабатический процесс.

Процесс, который происходит без обмена тепловой энергии с окружающей средой, называется адиабатическим процессом.

Примерами адиабатического процесса могут служить процессы, которые происходят быстро. Например, выполненная работа при быстром сжатии газа приводит к росту его температуры, т.е. внутренней энергии. Для распространения тепла в окружающую среду в результате повышения температуры требуется определенное время. Поэтому $Q=0$. Горение горючей смеси в двигателе внутреннего сгорания является примером адиабатического процесса.

Для адиабатического процесса первый закон термодинамики имеет следующий вид:

$$\Delta U + A = 0 \quad \text{или} \quad A = -\Delta U, \quad (6.3)$$

т.е. в адиабатическом процессе работа выполняется за счет изменения внутренней энергии.

Тепловыми машинами называют машины, которые превращают внутреннюю энергию горючего в механическую энергию.

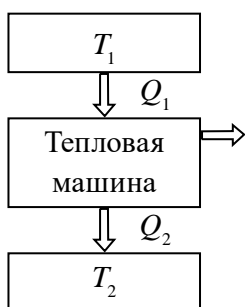


Рис. 6.1.

Принцип работы тепловой машины показан на рисунке 6.1. За один цикл нагреватель с температурой T_1 отдает некоторое количество тепла Q_1 , охладителю возвращается количество тепла Q_2 с температурой T_2 и выполняется работа в количестве $A = Q_1 - Q_2$. На рисунке 6.2. изображено устройство тепловой машины. Любой двигатель состоит из трех частей: рабочее вещество (газ или пар), нагреватель и охладитель. Когда рабочее вещество нагревается количеством тепла Q_1 от нагревателя, оно расширяется и выполняет работу.

В результате сжигания горючего температура нагревателя T_1 остается без изменения. При сжатии рабочее вещество передает количество тепла Q_2 охладителю с температурой T_2 . Тепловой двигатель должен работать циклически.

Круговым процессом или циклом называется процесс, в котором система проходит через несколько состояний и возвращается в

начальное состояние (рис. 6.3). Процесс, который происходит по направлению часовой стрелки (газ сначала расширяется, затем сжимается) называется **правильным циклом**, процесс, который происходит против часовой стрелки (газ сначала сжимается, затем расширяется) называется **обратным циклом**. Тепловые машины работают на основе правильного цикла, а холодильники работают на основе обратного цикла. Когда цикл завершается, рабочее вещество возвращается в свое первоначальное состояние, т.е. его внутренняя энергия равна начальному значению.

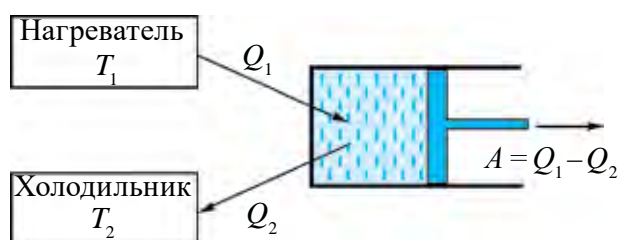


Рис. 6.2.

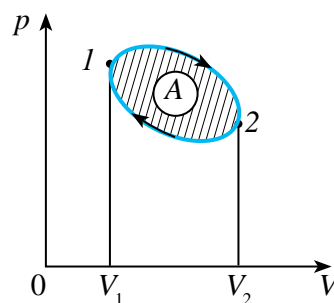


Рис. 6.3.

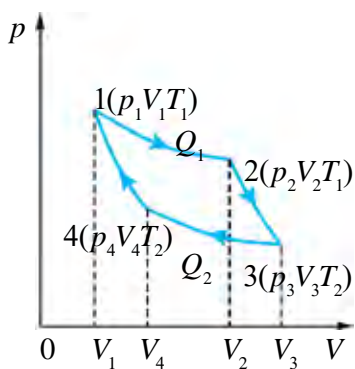


Рис. 6.4.

Цикл Карно – это **обратимый круговой тепловой процесс, который состоит из последовательно взаимно меняющихся двух изотермических и двух адиабатических процессов** (рис. 6.4).

Рассмотрим на примере поршневого цилиндра с коленчатым валом и шатуном (рис. 6.5) цикл, который состоит из двух изотермических и двух адиабатических процессов, так называемый цикл Карно.

1. На самом нижнем уровне поршня в цилиндре объем газа равен V_1 . Цилиндр помещен в сосуд с нагревателем температурой T_1 . В начале этого процесса (рис. 6.4) температура газа будет T_1 , давление p_1 и объем V_1 . На диаграмме pV обозначим под цифрой 1 первоначальное состояние газа. От нагревателя цилиндру передается количество тепла Q_1 и за счет полученного тепла объем газа изотермическим образом расширяется до объема V_2 . Значит, параметры газа во втором состоянии будут: p_2, V_2, T_2 . В этом состоянии газ выполняет работу A_1 . На диаграмме pV (рис. 6.4) изотермическое расширение газа показано изотермами 1–2.

2. На второй адиабатической стадии расширения, несмотря на уменьшение количества тепла Q_1 , поршень сдвигается с V_2 до V_3 . За счет внутренней энергии газа поршень выполняет работу A_2 , температура газа понижается. На диаграмме pV на рисунке 6.4 адиабатическое расширение газа показано адиабатами 2–3, параметры газа в этом состоянии будут: p_3 , V_3 , T_3 .

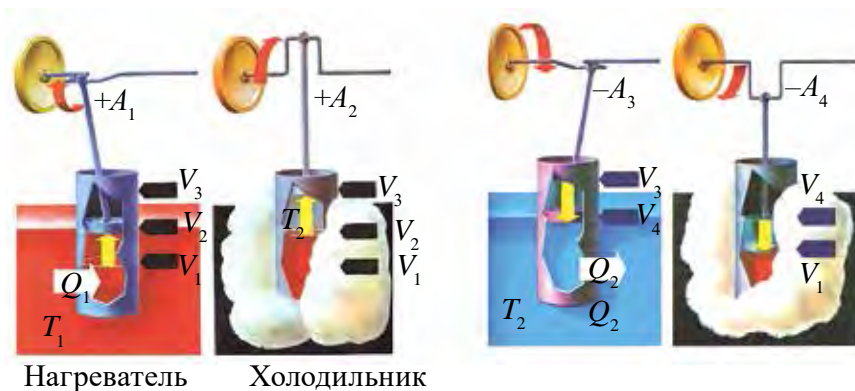


Рис. 6.5.

3. Для совершения изотермического сжатия газа цилиндр с температурой T_2 помещается в охладитель и поршень опускается, объем газа начинает уменьшаться с V_3 до V_4 . Чтобы этот процесс был изотермическим, работа A полностью превращается в тепло, газ передает охладителю количество тепла Q_2 , на диаграмме pV рисунка 6.4 изотермическое сжатие газа показано изотермой 3–4, параметры газа в этом состоянии будут: p_4 , V_4 , T_4 .

4. В последней части цикла газ адиабатически сжимается, поршень уменьшает объем газа с V_4 до V_1 . Здесь выполненная работа расходуется на повышение температуры газа до первоначального показателя и растет внутренняя энергия системы. На диаграмме pV рисунка 6.4 адиабатическое сжатие газа показано адиабатой 4–1, параметры газа в этом состоянии будут p_1 , V_1 , T_1 , т.е. принимают значения первоначального состояния.

Таким образом, идеальный газ возвращается в свое начальное состояние и полностью восстанавливает свою внутреннюю энергию. В течение цикла идеальный газ от нагревателя забирает количество тепла Q_1 и отдает охладителю количество тепла Q_2 . Согласно первому закону термодинамики, количество тепла $Q_2 - Q_1$ расходуется на выполнение работы и эта работа по количеству равна площади, охваченной циклом.

Коэффициент полезного действия тепловой машины. Коэффициентом полезного действия тепловой машины или цикла Карно называется следующая величина:

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}. \quad (6.4)$$

Если учесть работу, выполненную тепловой машиной, т.е. $A = Q_1 - Q_2$, получаем

$$\eta = \frac{A}{Q_1}. \quad (6.5)$$

Также КПД цикла Карно можно выразить через температуру нагревателя T_1 и охладителя T_2 :

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}. \quad (6.6)$$

Значит, КПД идеальной тепловой машины не зависит от вида рабочего вещества и определяется только температурами нагревателя и охладителя.

Из выражения (6.6) можно сделать следующие выводы:

1. Для повышения КПД тепловой машины следует повышать температуру нагревателя, а температуру охладителя следует понижать;
2. КПД тепловых машин всегда будет меньше единицы.

На основании выражения (6.6) Карно составил свою теорему о КПД. При заданных температурах нагревателя и охладителя КПД любого двигателя не будет больше, чем КПД цикла Карно.



1. Какое оборудование называется тепловой машиной?
2. Что такое цикл Карно?
3. Как определяется коэффициент полезного действия (КПД) тепловой машины?
4. Зависит ли КПД от вида рабочего вещества?
5. Что нужно сделать, чтобы увеличить КПД тепловой машины?

Тема 29. ЗНАЧЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В ЖИЗНИ ЧЕЛОВЕКА. ТЕПЛОВЫЕ ДВИГАТЕЛИ И ЭКОЛОГИЯ

Тепловые двигатели. К тепловым двигателям относятся паровая машина, паровая турбина, двигатель внутреннего сгорания, реактивный двигатель.

Паровая машина. В паровой машине и паровой турбине функцию нагревателя выполняет паровой котел, функцию рабочего вещества играет пар, функцию охладителя выполняет атмосфера или оборудование для охлаждения использованного пара – конденсатор.

Двигатель внутреннего сгорания. В двигателе внутреннего сгорания функцию нагревателя и рабочего вещества выполняет горючее, а функцию охладителя выполняет атмосфера.

Обычно в качестве горючего используют бензин, спирт, керосин или дизельное топливо. С помощью специального оборудования (например, карбюратор в бензиновых двигателях) горючее и воздух смешиваются и подаются в цилиндр. В цилиндре эта смесь сгорает. Продукты горения выбрасываются в атмосферу. Теперь остановимся подробно на некоторых видах двигателей.

Карбюраторный двигатель. Рассмотрим принцип работы и рабочие диаграммы четырехтактного карбюраторного двигателя (рис. 6.6). При движении поршня вниз под воздействием внешних сил (рис. 6.6а) открывается входной клапан и рабочее вещество попадает в цилиндр.

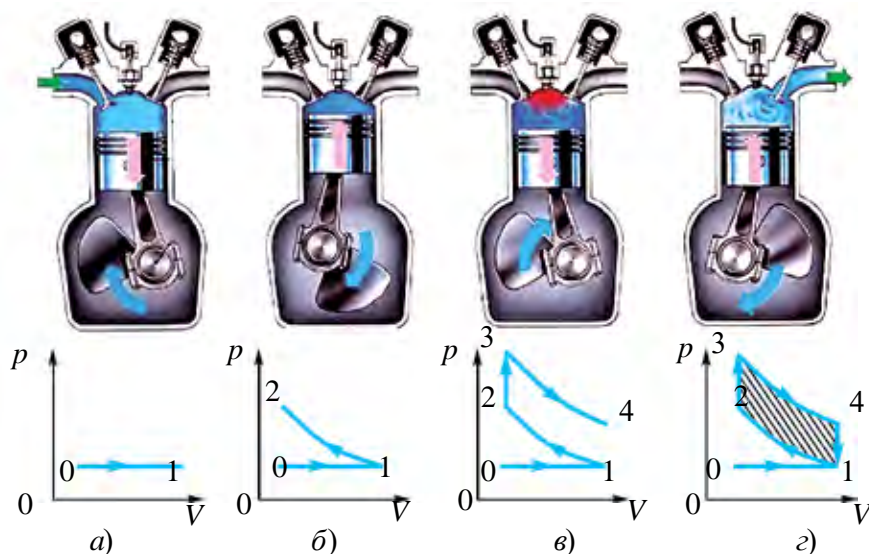


Рис. 6.6.

Процесс происходит под воздействием атмосферного давления изобарическим образом. Когда поршень доходит до самого нижнего положения, входной клапан закрывается и завершается первый такт (такт подсоса): на графике процесс показан прямой линией 0–1. Второй такт (сжатие) тоже происходит под воздействием внешних сил (рис. 6.6б).

Оба клапана закрыты и газ нагревается адиабатическим образом (на графике линия 1–2). В рабочем процессе третий такт – это горение со вспышкой (рис. 6.6в). Когда поршень доходит до верхнего уровня, свечи искрой поджигают горючую смесь и давление газа резко возрастает. На графике это соответствует изохорическому процессу 2–3. При закрытом клапане поршень двигается вниз, т.е. газ адиабатически расширяется. Линия 3–4 соответствует такту рабочего пути (рис. 6.6в). Как видно, в этом такте давление газа падает, объем увеличивается, температура понижается. В этом случае выполненная работа является положительной, она выполняется за счет уменьшения внутренней энергии газа. Четвертый такт выпуска изображен на рисунке 6.6г. Когда поршень опускается до самого нижнего положения, открывается клапан и продукты горения через выхлопное приспособление выбрасываются в окружающую среду. Понижается давление газа, в конце такта оно равно давлению атмосферы. На графике этот изохорический процесс показан линией 4–1. За счет энергии маховика поршень возвращается в верхнее положение и такт завершается.

Выполненная работа в рассмотренном закрытом процессе выделена линиями рабочих процессов и равна заштрихованной площади. Анализ графика показал, что расширение в части 3–4 по сравнению со сжатием части 1–2 происходит при относительно высоком давлении. В результате именно этого двигатель выполняет полезную работу. В изохорических процессах 3–2 и 4–1 ($V=\text{const}$) работа равна нулю и, как было отмечено, полезная работа определяется разницей адиабатического расширения и сжатия.

На практике КПД двигателей внутреннего сгорания составляет 20–30%. Для увеличения КПД горючую смесь нужно сильнее сжимать. Однако в двигателях внутреннего сгорания горючую смесь нельзя сжимать слишком сильно, так как сжатое горючее может нагреться и само по себе загореться. Это нарушит принцип работы двигателя.

Дизель. Немецкий инженер Дизель, приняв во внимание описанные выше недостатки, создал двигатель с относительно высоким КПД. В дизелях степень сжатия топлива намного выше, в итоге температура воздуха достаточно высока, чтобы горючее сгорало само по себе.

Горючее сгорает не сразу, как в карбюраторных двигателях, а постепенно, в течение определенной части движения поршня. Процесс горения горючего происходит в ходе увеличения объема рабочего пространства. Поэтому давление газа в ходе работы остается без изменения. Таким образом, в дизеле процесс горения смеси происходит при неизменном давлении. В карбюраторных двигателях этот процесс происходит при неизменном объеме. Дизель считается более экономичным по сравнению с карбюраторными двигателями, его КПД намного выше, и составляет примерно 40%. Его мощность тоже может быть намного выше, при этом дизельный двигатель работает на более дешевой топливе. Дизели широко используются в стационарном оборудовании, в железнодорожном, воздушном и водном транспорте. В настоящее время маломощные дизельные двигатели часто применяются в автомашинах и тракторах.

Реактивный двигатель. На рисунке 6.7 показано схематическое устройство реактивного двигателя. Принцип его работы следующий. Когда самолет летит, встречный поток воздуха проходит через сопло, смешивается с топливом, которое разбрызгивается форсункой и создает рабочую смесь. Затем смесь попадает в камеру сгорания, где происходит возгорание с помощью свечи зажигания. Газы, образованные в результате горения рабочего топлива, с большой скоростью выбрасываются через выходную щель – сопло. Горение смеси приводит к резкому повышению давления и в результате скорость выхода газа через сопло будет намного выше, чем скорость газа, входящего в двигатель. Именно в результате разницы этих скоростей, согласно закону сохранения импульса, появляется реактивная сила тяги.

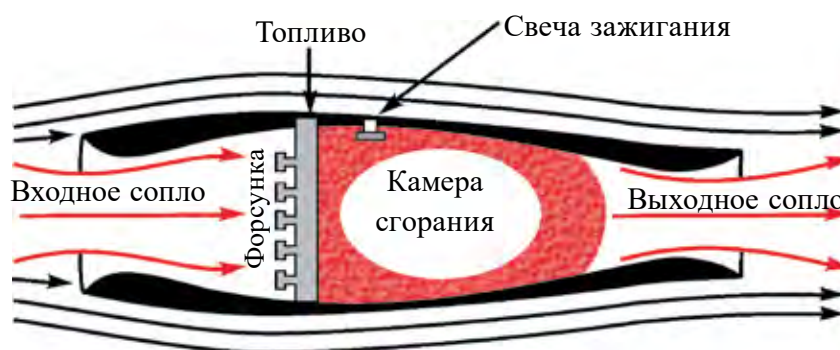


Рис. 6.7.

КПД современных тепловых машин составляет от 40% (двигатели внутреннего сгорания) до 60% (реактивные двигатели). Поэтому ученые ведут постоянную исследовательскую работу по усовершенствованию существующих двигателей. Однако неуклонный рост количества дви-

гателей внутреннего сгорания создает большую опасность для природы и окружающей среды. Одной из самых актуальных проблем сегодняшнего дня является создание экологически чистых двигателей.

Охрана природы. Высшее творение природы – человек, а также животный и растительный мир тоже являются частью этой природы. Для их существования и развития необходимы чистый воздух, чистая вода и чистые продукты. Вдыхаемый нами воздух является смесью газов, составляющих атмосферу Земли. В его составе имеются кислород, азот, водород, пыль, дым, состоящий из других природных газов, соли и другие смеси. Кроме этого в составе воздуха имеются также промышленные отходы.

Использование в больших количествах тепловых двигателей отрицательно влияет на окружающую среду. По статистике на земном шаре ежегодно сжигают 2 миллиарда тонн угля и 1 миллиард тонн нефти. Это может привести к повышению температуры на Земле, что приведет к таянию ледников и повышению уровня воды в океанах. Кроме этого, в атмосферу выбрасывается 120 миллион тонн золы и 60 миллионов тонн ядовитых газов.

Больше 200 миллионов автомобилей во всем мире ежедневно отравляют атмосферу углекислым газом, азотом и углеводородом. С увеличением мощностей тепловых и атомных электростанций увеличивается потребность в воде. Поэтому сейчас пользуются непосредственными и косвенными методами предохранения от загрязнения воздушных и водных бассейнов. Непосредственный метод – это фильтрация различных дымов и газов при выпуске в атмосферу; использование менее загрязняющего атмосферу топлива – природного газа, нефти без серы и др.; создание автомобильных двигателей, работающих без бензина и т.д.

Косвенные методы приводят к резкому уменьшению концентрации ядовитых газов в нижних слоях атмосферы. К ним относятся увеличение высоты источников отходов, использование различных способов, способствующих рассеянию газовых смесей в воздухе с учетом метеорологических условий и т.д.



- 1. Из чего состоят тепловые двигатели?*
- 2. Объясните принцип работы карбюраторного двигателя.*
- 3. Что мешает увеличению КПД двигателя внутреннего сгорания?*
- 4. Объясните принцип работы дизеля.*
- 5. Объясните принцип работы реактивного двигателя.*
- 6. Какие меры принимаются для охраны окружающей среды?*

Образец решения задачи.

Определите работу, выполненную при изотермическом сжатии газа, если в цикле Карно при изотермическом расширении газа выполнена работа, равная 8 Дж, а коэффициент полезного действия составляет 0,4.

Дано:	Формула решения:
$\eta = 0,4$	Составим pV -диаграмму цикла $\eta=0,4$; переход 1–2 показывает изотермическое расширение; переход газа 3–4 показывает изотермическое сжатие газа.
$A = 8 \text{ Дж}$	
$T = \text{const}$	
Найти:	
$A_s - ?$	

КПД цикла Карно определяется следующим образом:

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

здесь Q_1 – количество тепла, полученное газом от нагревателя, Q_2 – количество тепла, переданное газом охладителю. Выполненная работа при изотермическом расширении $A_{\text{расш}}$ равняется количеству тепла, полученного газом от нагревателя Q_1 . Работа, выполненная при изотермическом сжатии $A_{\text{сж}}$, равняется количеству тепла, отданного газом охладителю, т.е. $Q_1 = A_{\text{расш}}$; $Q_2 = A_{\text{сж}}$.

Тогда КПД цикла приобретает следующий вид:

$$\eta = \frac{A_{\text{расш}} - A_{\text{сж}}}{A_{\text{расш}}}.$$

Находим $A_{\text{сж}}$ и вычисляем, подставляя данные:

$$A_{\text{сж}} = (1 - 0,4) \cdot 8 \text{ Дж} = 4,8 \text{ Дж}. \quad \text{Ответ: } A_{\text{сж}} = 4,8 \text{ Дж}.$$

Упражнение 6.

1. Как изменится внутренняя энергия гелия массой 200 г при увеличении его температуры на 20 °С? (Ответ: $\Delta U = 12,5 \text{ кДж}$).

2. Определите работу кислорода массой 320 г, выполненную при изобарическом повышении температуры на 10 К? (Ответ: $A = 830 \text{ Дж}$).

3. В емкость с водой введен водяной пар массой 200 г при температуре 100°С. После конденсации пара найдите общую температуру, если масса воды 1,5 кг, а температура 15°С (Ответ: $t = 89^\circ\text{C}$).

4. Найдите выполненную работу газа массой 290 г и переданное количество тепла при изобарическом повышении температуры на 20 К. (Ответ: 1,7 кДж; 5,8 кДж).

5. При изобарическом повышении температуры на 500 К газа объемом 800 моль, ему было передано количество тепла 9,4 МДж. Определите выполненную работу газа и посчитайте на сколько увеличилась внутренняя энергия газа. (Ответ: 3,3 МДж; 6,1 МДж).

6. При изобарическом повышении температуры кислорода массой 160 г и начальной температурой 27°C, его объем увеличился в два раза. Найдите работу, выполненную при расширении газа, и количество тепла, израсходованное для согревания кислорода и изменения внутренней энергии. (Ответ: 12,5 кДж; 44,2 кДж; 31,7 кДж).

7. В идеальной тепловой машине температура нагревателя 117°C, охладителя 21°C. Количество тепла, получаемое от нагревателя за 1 сек., равно 60 кДж. Вычислите КПД машины, количество тепла, передаваемое охладителю за 1 сек. и мощность машины. (Ответ: 23 %; 146 кДж; 14 кВт).

8. В идеальной тепловой машине при выполнении работы, равной 300 Дж, расходуется 1 КДж получаемой от нагревателя энергии. Найдите КПД машины и температуру нагревателя, если температура охладителя равна 280 К. (Ответ: 30 %; 400 К).

9. Найдите КПД двигателя трактора, который достигает мощности 110 кВт и расходует в час 28 кг дизельного топлива. (Ответ: 34 %).

10. Мотоцикл движется со скоростью 108 км/час, расход бензина на 100 км пробега составляет 3,7 л, а КПД двигателя – 25%. Определите среднюю мощность двигателя мотоцикла? (Ответ: 8,9 кВт).

Тестовые вопросы по итогам главы VI

1. **Покажите первый закон термодинамики.**
 A) $\Delta U = Q + A$; B) $Q = \Delta U + A$; C) $Q = \Delta U - A$; D) $\Delta U = Q - A$.
2. **Дополните предложение. Процесс, происходящий без теплового обмена с окружающей средой, называется ... процессом.**
 A) ... изотермическим; B) ... изохорическим;
 C) ... адиабатическим; D) ... изобарическим.
3. **Дополните предложение. Коэффициент полезного действия цикла Карно**
 A) равен единице; B) больше единицы;
 C) равен нулю; D) меньше единицы.
4. **Тепло само по себе не переходит от тела с низкой температурой к телу с высокой температурой. Как называется это понятие?**
 A) I закон термодинамики; B) Термодинамическое равновесие;
 C) II закон термодинамики; D) Термодинамический процесс.
5. **Дополните предложение. Машина, которая превращает внутреннюю энергию топлива в механическую энергию, называется**
 A) ... тепловым двигателем; B) ... тепловой машиной;
 C) ... реактивным двигателем; D) ... паровой турбиной.

Основные понятия, правила и законы, изученные в главе VI

Термодинамическая система	Комплекс веществ и тел, которые взаимодействуют между собой и внешними телами и обмениваются энергиями.
Температура	Физическая величина, характеризующая термодинамическое равновесное состояние макроскопической системы.
Макроскопическая система	Система, состоящая из многочисленных атомов и молекул.
Термодинамическое равновесие	Процесс, при котором макроскопические параметры системы долгое время остаются без изменения.

Термодинамический процесс	Изменение хотя бы одного параметра термодинамической системы.
Обратимый процесс	Процесс, который может проходить как в прямом, так и в обратном направлении через одинаковые промежуточные состояния без изменений в окружающей среде.
Необратимый процесс	Процесс, который подвержен сопротивлению либо происходит с передачей теплоты от теплого тела холодному.
Внутренняя энергия	Сумма кинетических энергий беспорядочного движения всех молекул вещества и потенциальных энергий их взаимодействия.
Первый закон термодинамики	$Q = \Delta U + A$. Q – количество тепла; ΔU – изменение внутренней энергии; A – выполненная работа.
Второй закон термодинамики	Тепло само по себе не переходит от тела с низкой температурой к телу с высокой температурой..
Адиабатический процесс	Процесс, происходящий без обмена количеством тепла с окружающей средой.
Тепловая машина	Машины, которые превращают внутреннюю энергию топлива в механическую энергию.
Круговой процесс или цикл	Процесс, который, переходя через несколько состояний системы, возвращается в свое первоначальное состояние.
Цикл Карно	Возвратный круговой тепловой процесс, состоящий из взаимно меняющихся по очереди двух изотермических и двух адиабатических процессов.
Коэффициент полезного действия тепловых машин	$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}$, Q_1 – количество тепла, полученное от нагревателя, Q_2 – количество тепла, переданное охладителю.

ГЛАВА VII. ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

Тема 30. ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ЗАРЯДА. ПОЛЕ ТОЧЕЧНОГО ЗАРЯДА. ПРИНЦИП СУПЕРПОЗИЦИИ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

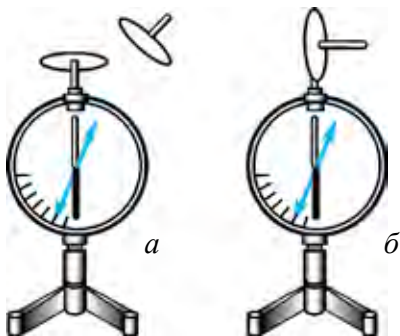


Рис. 7.1.

Закон сохранения заряда. Изменится ли общий заряд тела, когда тело электризуется? Чтобы ответить на этот вопрос, проведем следующий опыт (рис. 7.1а).

Возьмем электрометр, на его стержень установим металлический диск. Накрыв диск кусочком плотной ткани, потрем его другим диском, который имеет изолированную ручку. При этом стрелка электрометра будет наклоняться. Это показывает, что на ткани и диске появились электрические заряды.

Продолжим опыт. Диск, которым натерли ткань, соединяем со стрелкой второго электрометра (рис.7.1б). В этом случае стрелка второго электрометра тоже повернется. Угол наклона стрелки равняется углу наклона стрелки первого электрометра. Это показывает, что оба диска зарядились одинаково. Если соединить стержни каждого из двух электрометров металлическим проводником, мы увидим, что стрелки обоих электрометров приходят в нулевое положение. Это явление показывает, что электрометры имели равные по количеству, но разные по знаку заряды. Поэтому сумма этих зарядов равна нулю.

Все опыты по электризации показали, что невозможно зарядить только одно тело. Чтобы зарядить тело, обязательно требуется второе тело. Какой

отрицательный заряд получает одно из тел в процессе зарядки, такой же положительный заряд получит второе тело. В результате общее количество зарядов тела остается без изменения.

Алгебраическая сумма зарядов всех тел, входящих в любую закрытую систему, остается постоянной, т.е.:

$$q_1 + q_2 + \dots + q_n = \text{const.} \quad (7.1)$$

Этот вывод называется *законом сохранения электрических зарядов*.

Закон сохранения зарядов открыт в 1750 году американским ученым и политическим деятелем Бенджамином Франклином.

Согласно теории Фарадея и Максвелла, вокруг наэлектризованных тел создается электрическое поле. Взаимодействие происходит как раз посредством этого электрического поля. Это поле невозможно потрогать руками или увидеть глазами. Его можно только почувствовать.

Изучение воздействия электрического поля на заряженные частицы показало, что воздействие поля вблизи заряженного тела сильнее, а с удалением от него воздействие становится слабее. Чтобы показать, насколько сильно поле, созданное электрическим зарядом, введена величина, которая называется напряженностью электрического поля. Напряженность электрического поля определяется формулой:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0} \quad (7.2)$$

Здесь \vec{E} – напряженность поля в определенной его точке; q_0 – количество заряда, помещенного в эту точку поля; $|\vec{F}|$ – сила, действующая на помещенный заряд q_0 со стороны электрического поля.

Электрическое поле характеризуется с помощью силовых линий или линий напряженности (рис. 7.2 и 7.3). Напряженность электрического поля является векторной величиной и направлена по направлению силовых линий.

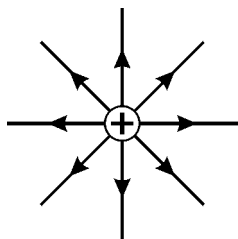


Рис. 7.2.

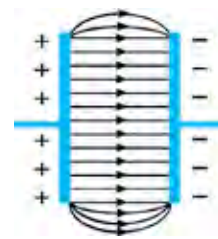
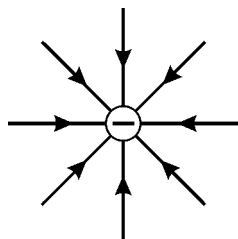


Рис. 7.3.

Единица напряженности $[E] = \frac{|F|}{|q|} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{Кл}}$ или $1 \frac{\text{В}}{\text{м}}$.

Подсчитаем напряженность поля точечного заряда q на расстоянии r :

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}; \quad F = k \frac{|q| \cdot |q_0|}{r^2}; \quad E = \frac{k \frac{|q| \cdot |q_0|}{r^2}}{|q_0|} = k \frac{|q|}{r^2};$$

$$E = k \frac{|q|}{r^2}. \quad (7.3)$$

Здесь r – расстояние от точечного заряда до точки, где определяется напряженность поля; $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}}$.

Электрическое поле в основном создают системы зарядов. Например, если в определенную точку поля, созданного системами зарядов q_1 и q_2 ввести пробный заряд, то на него со стороны каждого заряда будут действовать силы \vec{F}_1 и \vec{F}_2 (рис. 7.4). Среднее значение сил, воздействующих на пробный заряд, равно:

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2. \quad (7.4)$$

В этом случае напряженность поля в точке A равняется:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2. \quad (7.5)$$

На основании выражения (7.5) делаем следующий вывод:

Напряженность электростатического поля, создаваемого в данной точке системой зарядов, равна векторной сумме напряженностей полей, создаваемых в этой точке каждым зарядом в отдельности.

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \dots + \vec{E}_n. \quad (7.6)$$

Это уравнение называется принципом суперпозиции электрического поля.

Смысл слова «суперпозиция» означает «суммирование или «сложения».

Вычислим по принципу суперпозиции напряженность поля, создаваемого в определенной точке двумя точечными зарядами, расположенными на расстоянии r друг от друга (рис. 7.4). Напряженность

поля каждого заряда в рассматриваемой точке определяется выражением $\vec{E}_1 = k \frac{|q_1|}{r_1^2}$ и $\vec{E}_2 = k \frac{|q_2|}{r_2^2}$. Итоговая напряженность поля заряда в данной точке по принципу суперпозиции вычисляется на основании следующей формулы:

$$E = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2 \cdot \cos \alpha}. \quad (7.7)$$

Здесь E_1 и E_2 соответственно напряженности полей точечных зарядов в рассматриваемой точке, α – угол между векторами напряженности поля.

Образец решения задачи.

Два противоположно заряженных точечных заряда величиной по 4 нКл каждый расположены на расстоянии 10 см друг от друга. Чему равна напряженность поля в точке, расположенной на расстоянии 8 см от первого заряда, 6 см от второго заряда?

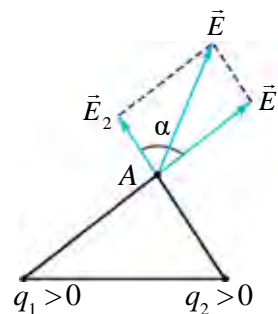


Рис. 7.4.

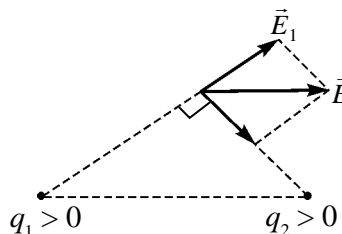
Дано:

$$\begin{aligned} q_1 &= 4 \text{ нКл} = 4 \cdot 10^{-9} \text{ Кл} \\ q_2 &= -4 \text{ нКл} = -4 \cdot 10^{-9} \text{ Кл} \\ r &= 10 \text{ см} = 10 \cdot 10^{-2} \text{ м} \\ r_1 &= 8 \text{ см} = 8 \cdot 10^{-2} \text{ м} \\ r_2 &= 6 \text{ см} = 6 \cdot 10^{-2} \text{ м} \\ k &= 9 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{Кл}^2 \end{aligned}$$

Найти:

E – ?

Формула и решение:



$$r_1^2 + r_2^2 = r^2 \text{ из-за } \alpha = 90^\circ$$

$$E = \sqrt{E_1^2 + E_2^2} = k \cdot q \sqrt{\frac{1}{r_1^2} + \frac{1}{r_2^2}}$$

$$\begin{aligned} E &= 9 \cdot 10^9 \cdot 4 \cdot 10^{-9} \sqrt{\frac{1}{(8 \cdot 10^{-2})^2} + \frac{1}{(6 \cdot 10^{-2})^2}} = \\ &= 750 \frac{\text{Н}}{\text{Кл}} \end{aligned}$$

Ответ: $750 \frac{\text{Н}}{\text{Кл}}$.



1. Как вычисляется напряженность поля точечного заряда в какой-либо точке?
2. Что означает слово суперпозиция?
3. Объясните принцип суперпозиции и напишите формулу.

Тема 31. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ ЗАРЯЖЕННОГО ШАРА. ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ВОСПРИИМЧИВОСТЬ

Пусть электропроводящий шар радиусом R будет иметь заряд q (рис. 7.5а). Определим напряженность поля, создаваемого заряженным шаром (сферой) в его центре, на поверхности и за его пределами. Для этого мы сначала разделим заряд q на несколько зарядов, равномерно распределенных по поверхности шара, т.е. $q = q_1 + q_2 + q_3 + \dots + q'_1 + q'_2 + q'_3 + \dots$

Итоговая напряженность поля q_1 и q'_1 любых одинаковых зарядов в центре шара на основе принципа суперпозиции равна нулю. Значит, внутри заряженной сферы напряженность поля будет равна нулю.

Найдем напряженность поля в произвольной точке A , расположенной на расстоянии r от поверхности шара. Выделим пару зарядов q_1 и q'_2 , расположенных симметрично линии OA . Эти заряды создают напряженность на оси, направленной по оси Or . Значит, силовые линии напряженности поля в точке за пределами шара соответствуют силовым линиям положительно заряженного точечного заряда, направленным из центра шара (рис. 7.5 б)

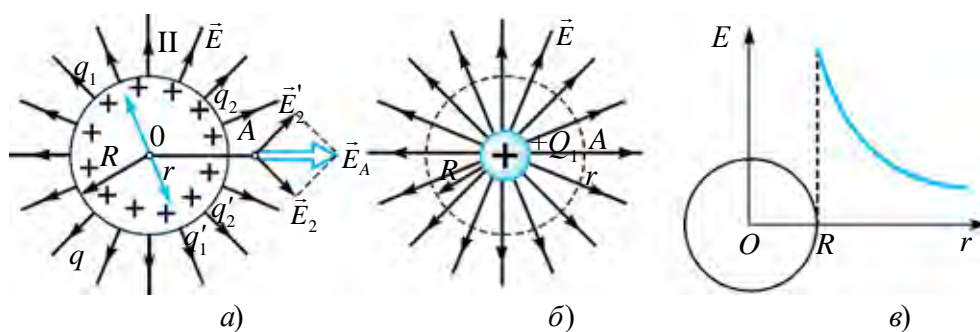


Рис. 7.5.

Напряженность электрического поля на поверхности заряженного шара определяется следующей формулой:

$$E = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 R^2}.$$

Из-за того, что напряженность поля, созданного в точке за пределами заряженного шара, одинаковы с полем, созданным точечным зарядом, напряженность поля, созданного в точке за пределами шара, определяется по формуле:

$$E = \frac{|q|}{4\pi\epsilon_0 r^2} = k \cdot \frac{|q|}{r^2}. \quad (7.6)$$

Это означает, что напряженность поля уменьшается обратно пропорционально квадрату расстояния (рис. 7.5 в).

Напряженность электрического поля зависит от свойств среды, в которой расположен заряд, создающий поле. Рассмотрим случай, когда между двумя противоположно заряженными пластинами помещен диэлектрик (рис. 7.6).

В диэлектрике свободных электронов очень мало. Основные электроны расположены в электронной оболочке атома. Под воздействием поля электрических зарядов пластин электронная оболочка деформируется. В результате центры положительных и отрицательных зарядов атома не накладываются друг на друга. Это явление называется *поляризацией диэлектрика*.

Напряженность поля \vec{E}' , создаваемого поляризованными атомами (молекулами), направлена противоположно напряженности основного поля \vec{E}_0 . В результате общая напряженность поля снижается $\vec{E} = \vec{E}_0 - \vec{E}'$. Величина, показывающая во сколько раз уменьшается напряженность поля, называется *диэлектрической восприимчивостью* диэлектрика:

$$\epsilon = \frac{E_0}{E}. \quad (7.7)$$

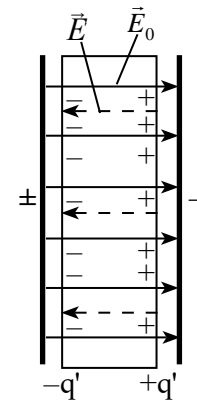


Рис. 7.6.

В таком случае напряженность поля в точке, расположенной на расстоянии r от точечного заряда, расположенного в диэлектрике, тоже уменьшается в ϵ раз:

$$E = k \frac{|q|}{\epsilon \cdot r^2}. \quad (7.8)$$

Также сила взаимодействия точечных зарядов, расположенных в однородном диэлектрике, будет в ϵ раз меньше, чем сила их взаимодействия в вакууме, и сила этого взаимодействия вычисляется с помощью следующего выражения:

$$F = k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{\epsilon \cdot r^2}. \quad (7.9)$$

Диэлектрическая восприимчивость – это безразмерная величина.



1. Почему внутри заряженного шара электрическое поле равно нулю?
2. Как вычисляется электрическое поле на поверхности заряженного шара и за его пределами?
3. Почему диэлектрические вещества понижают напряженность электрического поля?

Тема 32. ПОТЕНЦИАЛ ПОЛЯ ТОЧЕЧНОГО ЗАРЯДА. РАЗНОСТЬ ПОТЕНЦИАЛОВ

Чтобы определить силу электрического поля, мы ввели в него пробный заряд и определили силу воздействия поля на этот заряд. Напряженность электрического поля является характеристикой силы поля.

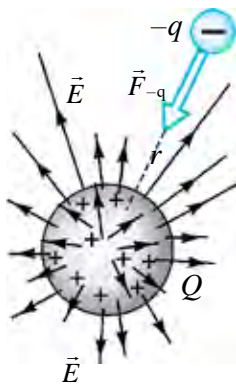


Рис. 7.7.

При введении пробного заряда в поле, оно оказывает сопротивление (рис. 7.7). Для преодоления сопротивления необходимо проделать определенную работу.

Как определяется эта выполненная работа?

Эта работа превращается в потенциальную энергию взаимодействия основного заряда и введенного пробного заряда:

$$W_{-q} = -k \frac{Qq}{r}. \quad (7.9)$$

Знак минус в формуле показывает, что между зарядами действует сила притяжения.

Потенциальная энергия $+q$ заряда, расположенного на расстоянии r от положительного неподвижного заряда Q , определяется следующим выражением

$$W_{+q} = k \frac{Qq}{r}. \quad (7.10)$$

Положительный знак в формуле показывает, что между зарядами действует сила отталкивания.

Согласно формуле потенциальная энергия равняется нулю, когда расчет производится для бесконечного расстояния. На таких расстояниях заряды не взаимодействуют.

Таким образом, электрическое поле с приобретением характеристики силы будет иметь и энергетическую характеристику. Энергетическая характеристика поля определяется величиной, которая называется потенциалом поля.

Потенциалом электрического поля точечного заряда называется величина, измеряемая отношением потенциальной энергии взаимодействия основного и введенного в поле пробного заряда к величине пробного заряда:

$$\varphi = \frac{W_{-q}}{q}. \quad (7.11)$$

Потенциал точечного заряда q определяется следующим образом:

$$\varphi = k \frac{q}{\varepsilon \cdot r}. \quad (7.12)$$

Пользуясь понятием потенциала найдем работу, совершаемую при перемещении заряда q_1 с расстояния r_1 на расстояние r_2 от заряда q , создающего электрическое поле:

$$A = W_1 - W_2 \text{ или } A = q_1 \left(k \frac{q}{\varepsilon \cdot r_1} - k \frac{q}{\varepsilon \cdot r_2} \right) = q_1 (\varphi_1 - \varphi_2). \quad (7.13)$$

В этом выражении разность $\varphi_1 - \varphi_2$ является разницей потенциалов между точками, называется электрическим напряжением и записывается следующим образом:

$$U = \varphi_1 - \varphi_2. \quad (7.14)$$

Единица измерения потенциала и разность потенциалов называется **Вольт (В)** в честь итальянского ученого Вольта. Из формулы $\varphi = \frac{W}{q}$ следует, что $1\text{В} = \frac{1\text{Дж}}{1\text{Кл}}$. Это значит, что разность потенциалов точек равняется 1 вольту, когда заряд, равный 1 кулону, при перемещении из одной точки электрического поля в другую выполняет работу, равную 1 Дж.

Потенциалы точек, расположенных на одинаковых расстояниях от точечного заряда, равны. Если эти точки соединить между собой, образуется поверхность, которая называется **эквипотенциальной поверхностью**.

Эквипотенциальная поверхность точечного заряда располагается вокруг заряда в виде сконцентрированных кругов (рис. 7.8). Силовые линии поля проходят перпендикулярно к эквипотенциальной поверхности.

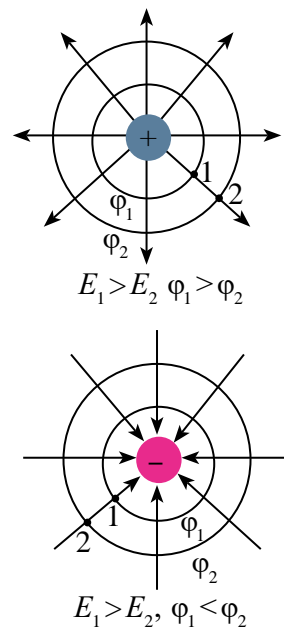


Рис. 7.8.

Между напряженностью электрического поля и разностью потенциалов существует следующее соотношение:

$$E = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{d}, \quad (7.15)$$

где d – расстояние между точками, потенциал которых равен φ_1 и φ_2 . Отсюда получаем единицу измерения напряженности поля $1 \frac{\text{В}}{\text{м}}$.

Образец решения задачи.

В металлическую сферу радиусом 5 см, висящую в воздухе, подали заряд 30 нКл. Нужно найти потенциалы поля в точках, находящихся в 2 см от центра заряженной сферы, на поверхности сферы и удаленной от поверхности на расстояние 5 см.

<p>Дано:</p> <p>$q = 30 \text{ нКл} = 30 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$</p> <p>$r = 5 \text{ см} = 5 \cdot 10^{-2} \text{ м}$</p> <p>$r_1 = 2 \text{ см} = 2 \cdot 10^{-2} \text{ м}$</p> <p>$r_2 = 5 \text{ см} = 5 \cdot 10^{-2} \text{ м}$</p> <p>$k = 9 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{Кл}^2$</p> <hr/> <p>Найти:</p> <p>$\varphi_{\text{внутр.}} - ?$</p> <p>$\varphi_{\text{поверх.}} - ?$</p> <p>$\varphi_{\text{внеш.}} - ?$</p>	<p>Формула:</p> <p>$\varphi_{\text{внутр.}} = \varphi_{\text{поверх.}} =$</p> <p>$= k \frac{q}{r}$</p> <p>$\varphi_{\text{внеш.}} =$</p> <p>$= k \frac{q}{r + r_2}$</p>	<p>Решение:</p> <p>$\varphi_{\text{внутр.}} = \varphi_{\text{поверх.}} = 9 \cdot 10^9 \frac{30 \cdot 10^{-9}}{5 \cdot 10^{-2}} = 5400 \text{ В};$</p> <p>$\varphi_{\text{внеш.}} = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{30 \cdot 10^{-9}}{5 \cdot 10^{-2} + 5 \cdot 10^{-2}} =$</p> <p>$= 2700 \text{ В.}$</p> <p>Единица измерения:</p> <p>$[\varphi] = \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2} \cdot \frac{\text{Кл}}{\text{м}} \cdot \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{Кл}^2} \cdot \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}} \text{ В.}$</p> <p>Ответ: 5400 В; 2700 В.</p>
--	--	---



1. Напишите выражение, связывающее работу, выполняемую электростатической силой и потенциальной энергией при перемещении заряда в поле.
2. Как определяется потенциальная энергия заряда, помещенного в электрическое поле?
3. Найдите потенциал электрического поля на расстоянии $5,3 \cdot 10^{-11} \text{ м}$ от протона. Чему равна потенциальная энергия электрона, вращающегося таком же расстоянии от протона?

Тема 33. РАБОТА, ВЫПОЛНЯЕМАЯ ПРИ ПЕРЕМЕЩЕНИИ ЗАРЯДА В ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Физические величины, введенные в механике (перемещение, сила, выполненная работа силы, потенциальная энергия) используются при описании любого фундаментального взаимодействия, в том числе электромагнитного взаимодействия.

Работа A силы тяжести, выполненная при перемещении тела в однородном гравитационном поле ($g = \text{const}$) по \vec{g} на расстояние h рассчитывается по формуле $A = mgh$ (рис. 7.9).

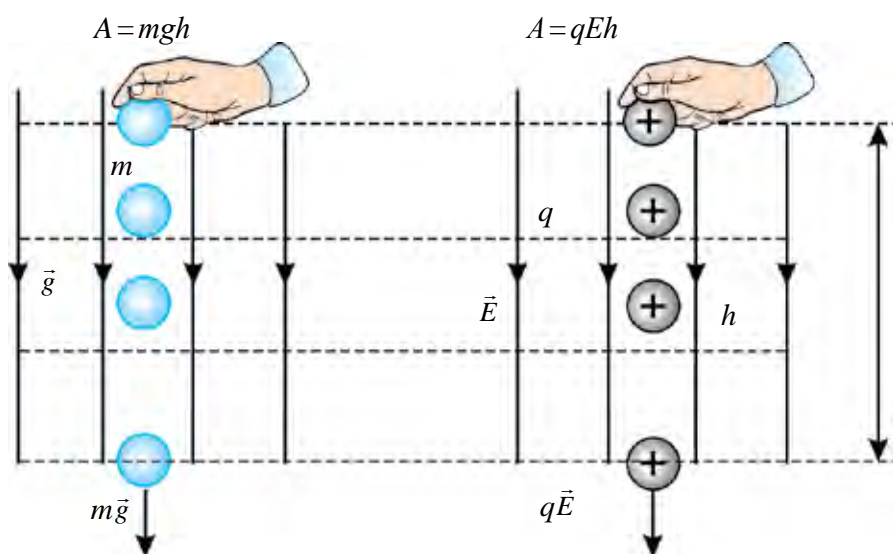


Рис. 7.9.

Выполненная работа при перемещении заряда $+q$ в однородном электрическом поле ($\vec{E} = \text{const}$) по силовым линиям поля равна:

$$A_q = qEh \quad (7.16)$$

Эта формула действительна при соответствии напряженности электрического поля с направлением перемещения.

Рассмотрим случаи, когда их направления не соответствуют.

При перемещении электрического заряда q (в случае $q > 0$), введенного в однородное электрическое поле, в направлении электрического поля или в обратном направлении (в случае $q < 0$), электрическое поле выполняет работу. Для вычисления работы расположим ось X в одном направлении с напряженностью поля (рис. 7.10).

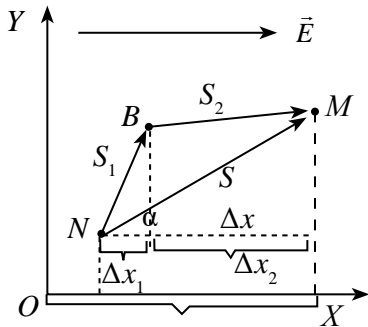


Рис. 7.10.

Сила, действующая со стороны поля на заряд с положительным знаком, тоже будет направлена вдоль оси X . Если заряд в поле под воздействием силы $\vec{F} = q\vec{E}$ перемещен из точки N в точку M на расстоянии S выполненную для перемещения заряда работу электрической силы можно найти по следующей формуле:

$$A = F \cdot s \cdot \cos\alpha = q \cdot E \cdot s \cdot \cos\alpha. \quad (7.17)$$

Здесь α – угол между силой и перемещением.

Учитывая, что $\Delta x = x_2 - x_1 = s \cdot \cos\alpha$, урав-

нение (7.17) примет вид:

$$A = qE\Delta x. \quad (7.18)$$

Теперь вычислим выполненную работу при перемещении заряда q по ломаной линии NBM в электростатическом поле. Поскольку работа является скалярной величиной, работа, выполненная для перемещения NBM , равна алгебраической сумме работ, выполненных на отрезках NB и BM

$$A = A_1 + A_2.$$

Работы A_1 и A_2 при перемещении заряда будут определены как выполненная работа при перемещении заряда на расстояние NM , т.е.

$$A_1 = qE\Delta x_1 \text{ и } A_2 = qE\Delta x_2. \quad (7.19)$$

Здесь Δx_1 и Δx_2 соответственно проекции на ось X векторов перемещения s_1 и s_2 . В формулу (7.18) подставим (7.19) и получим:

$$A = qE(\Delta x_1 + \Delta x_2) = qE\Delta x.$$

Из этого следует, что выполненная работа при перемещении заряда в однородном электрическом поле не зависит от формы траектории перемещения, а зависит только от расстояния между начальным и конечным местоположением заряда (т.е. от Δx – величины перемещения заряда). Такое поле называется *потенциальным полем*. Значит, электростатическое поле является потенциальным полем. Поэтому выполненная работа при перемещении заряда в электростатическом поле по закрытому контуру постоянно равняется нулю. Сила, работа которой не зависит от траектории движения, называется **консервативной силой**.

Если учесть, что $E \cdot \Delta x = \varphi_2 - \varphi_1$, то имеем

$$A = q(U_2 - U_1) \quad (7.20)$$

Формула (7.20) используется для вычисления выполненной работы при перемещении электрического заряда q в электрическом поле из точки с потенциалом φ_2 в точку с потенциалом φ_1 .

Образец решения задачи.

В однородном электрическом поле с напряженностью поля 4 кВ/м точечный заряд величиной 100 мкК сместился на расстояние 4 см, при этом электростатическим полем была совершена работа 8 мДж. Определите угол между силовыми линиями поля и вектором смещения?

Дано:	Формула:	Решение:
$q = 100 \text{ мкКл} = 100 \cdot 10^{-6} \text{ Кл}$	$A = q \cdot E \cdot s \cdot \cos \alpha$	$\cos \alpha = \frac{8 \cdot 10^{-3}}{10^{-4} \cdot 4 \cdot 10^3 \cdot 4 \cdot 10^{-2}} = \frac{1}{2}$ $\cos \alpha = \frac{1}{2}$ $\alpha = 60^\circ.$ <p style="text-align: right;">Ответ: 60°.</p>
$E = 4 \text{ кВ/м} = 4 \cdot 10^3 \text{ В/м}$	$\cos \alpha = \frac{A}{q \cdot E \cdot s}$	
$s = 4 \text{ см} = 4 \cdot 10^{-2} \text{ м}$		
$A = 8 \text{ мДж} = 8 \cdot 10^{-3} \text{ Дж}$		
Найти:		
$\alpha = ?$		



1. Какое поле называется потенциальным полем?
2. Чему равна выполненная работа при перемещении заряда по замкнутой линии в электростатическом поле?
3. Объясните разности потенциалов, пользуясь формулой (7.20).

Тема 34. ЭНЕРГИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Для зарядки проводника выполняется работа по преодолению силы отталкивания между зарядами. За счет этой работы проводник получает энергию. Полученная энергия заряженного тела количественно равна работе, выполненной при его зарядке, т.е. $A = W_{эл}$. (здесь, $W_{эл}$ – энергия электрического поля). Как вычисляется выполненная работа при зарядке проводника? Сначала, когда тело не заряжено, его потенциал равен нулю. Когда ему подадут заряд q , его потенциал изменяется от нуля до φ . Выполненная работа при зарядке тела равна:

$$A = q \cdot \varphi_{cp} \tag{7.21}$$

Среднее значение потенциала тела равно среднему арифметическому его начальных и конечных значений, т.е.

$$\varphi_{\text{cp}} = \frac{0 + \varphi}{2} = \frac{\varphi}{2}. \quad (7.22)$$

Поставляя значения φ_{cp} в уравнение (7.21), получим следующее выражение:

$$A = \frac{q\varphi}{2}. \quad (7.23)$$

Значит, работа, выполненная при зарядке тела, равняется половине произведения его заряда на потенциал. При зарядке тела его потенциал плавно, т.е. линейно изменяется согласно формуле $\varphi = \frac{q}{C}$. Здесь C – электрическая емкость проводника. Тогда выражение (7.23) можно записать следующим образом:

$$A = \frac{C \cdot \varphi^2}{2} \quad \text{и} \quad A = \frac{q^2}{2C} \quad (7.24)$$

Согласно соотношению $A = W_{\text{эл}}$, формулу для расчета энергии электрического поля изолированного заряженного тела можно записать в виде

$$W_{\text{эл}} = \frac{q \cdot \varphi}{2} = \frac{C \cdot \varphi^2}{2} = \frac{q^2}{2C}. \quad (7.25)$$

Если заряженное тело является конденсатором, то при расчете энергии ($W_{\text{кон}}$) его электрического поля величину заряда в формуле (7.25) нужно заменить на величину зарядов на одной обкладке конденсатора, а потенциал заменить на разницу потенциалов между обкладками, т.е., можно записать:

$$W_{\text{кон}} = \frac{q \cdot (\varphi_1 - \varphi_2)}{2} = \frac{C \cdot (\varphi_1 - \varphi_2)^2}{2} = \frac{q^2}{2C}. \quad (7.26)$$

Исходя из этого, формулу определения электрической энергии конденсатора можно записать в виде:

$$W_{\text{кон}} = \frac{qU}{2} = \frac{CU^2}{2} = \frac{q^2}{2C}. \quad (7.27)$$

Энергия заряженного тела сосредоточена в электрическом поле, созданном вокруг него, величина энергии зависит от объема пространства, занимаемого полем и напряженности поля.

Рассмотрим частный случай плоского заряженного конденсатора.

Электрическое поле, созданное зарядами обкладок плоского конденсатора, сосредоточено в среде между его обкладками. Объем пространства можно вычислить по формуле $V = Sd$.

Учитывая емкость заряженного плоского конденсатора $C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d}$ и зависимость между разницей потенциалов обкладок и напряженностью поля конденсатора, с учетом формулы (7.27), получим следующее соотношение:

$$W = \frac{CU^2}{2} = \frac{\epsilon_0 \epsilon \cdot SE^2 d^2}{2d} = \frac{\epsilon_0 \epsilon \cdot E^2}{2} V. \quad (7.28)$$

Энергия заряженного плоского конденсатора прямо пропорциональна квадрату напряженности созданного им поля и объему пространства, занимаемого этим полем. Энергия, приходящаяся на удельную единицу поля, называется *объемной плотностью энергии*. То есть:

$$\omega = \frac{W}{V} = \frac{\epsilon_0 \epsilon \cdot E^2}{2V} V = \frac{\epsilon_0 \epsilon \cdot E^2}{2}. \quad (7.29)$$

Каждый конденсатор имеет свойство накапливать в себе не только заряд, но и энергию. Энергия, полученная конденсатором, сосредоточена в среде между его обкладками. Эту энергию невозможно хранить длительное время. Конденсатор с течением времени передает полученный заряд в окружающую среду, т.е. разряжается.

При разрядке конденсатора через цепь с маленьким электрическим сопротивлением энергия передается практически мгновенно.

Образец решения задачи.

Емкость плоского воздушного конденсатора равна $0,1 \mu\text{Ф}$, разность потенциалов 200 В . Вычислите энергию электрического поля в конденсаторе.

Дано:	Формула:	Решение:
$C = 0,1 \mu\text{Ф} = 1 \cdot 10^{-7} \text{ Ф}$ $U_2 - U_1 = 200 \text{ В}$	$W = \frac{C(U_2 - U_1)^2}{2}$	$W = \frac{10^{-7} \cdot 40000}{2} \text{ Ф} \cdot \text{В}^2 = 2 \cdot 10^{-3} \text{ Дж}$
Найти: $W - ?$		Ответ: 2 мДж .



1. От каких величин зависит энергия, полученная заряженным телом?
2. Какая работа выполняется при зарядке конденсатора?
3. Где накапливается энергия заряженного конденсатора?

Упражнение 7

1. На двух вершинах равностороннего треугольника со стороной 10 см помещены заряды -4 нКл и $+4$ нКл. Чему равна напряженность поля в третьей вершине треугольника? (Ответ: 3,6 кВ/м).

2. В диэлектрической среде на расстоянии 6 см друг от друга расположены два заряда: 6 нКл и -8 нКл. Какова напряженность поля в середине расстояния? (Ответ: 140 кВ/м).

3. При перемещении точечного заряда между двумя точками с разностью потенциалов 100 В поле выполняет работу, равную 5 мДж. Найдите величину точечного заряда. (Ответ: 50 нКл).

4. Заряд 50 нКл в некоторой точке электростатического поля имеет потенциальную энергию 7,5 мДж. Найдите потенциал электрического поля в этой точке (Ответ: 150 В).

5. Точечные заряды $+0,4$ мКл и $-0,6$ мКл расположены на расстоянии 12 см друг от друга. Каким будет потенциал электрического поля в середине отрезка, соединяющего эти заряды? (Ответ: -30 кВ).

6. Два точечных заряда со значениями $3 \cdot 10^{-8}$ Кл находятся в воздухе на расстоянии 50 см друг от друга. Какую работу нужно выполнить, чтобы приблизить их на расстояние до 20 см? (Ответ: 10,8 мДж).

7. Если расстояние между двумя заряженными параллельными пластинами составляет 12 см, разность потенциалов 180 В, определите напряженность поля между пластинами. (Ответ: 1500 В/м).

8. Найдите разность потенциалов между двумя точками, находящимися на одной линии напряженности на расстоянии 2 см друг от друга, если напряженность однородного электрического поля составляет 6000 В/м (Ответ: 120 В).

9. Если напряжение на обкладках плоского конденсатора равно 150 В, а заряд 80 мКл, чему будет равна энергия поля конденсатора? (Ответ: 6 мДж).

10. Плоский конденсатор, получая заряд 2 мКл, имеет энергию поля, равную 0,5 мДж. Какова емкость конденсатора? (Ответ: 16 мФ).

11. Когда плоскому конденсатору передали заряд $4 \cdot 10^{-5}$ К, его энергия равнялась 20 мДж. Рассчитайте напряжение между обкладками конденсатора? (Ответ: 1000 В).

12. Найдите плотность энергии электрического поля в точке, где диэлектрическая восприимчивость равна 4, напряженность равна $3 \cdot 10^3$ В/м. (Ответ: 159 мДж/м³).

Тестовые вопросы по итогам главы VII

1. На заряд 5 мКл , расположенный в точке, где напряженность поля составляет 800 В/м , действует электростатическая сила (Н). Найдите значение электростатической силы (Н)?
A) $4 \cdot 10^{-2}$; B) $4 \cdot 10^{-3}$; C) $3,2 \cdot 10^{-5}$; D) $1,6 \cdot 10^{-5}$.
2. Чему равно ускорение (м/с^2) электрона, движущегося в электрическом поле с напряженностью $27,3 \text{ кВ/м}$? $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$.
A) $4,8 \cdot 10^{16}$; B) $4,8 \cdot 10^{15}$; C) $7,2 \cdot 10^{16}$; D) $9,6 \cdot 10^{15}$.
3. Заряженная капля массой $1 \cdot 10^{-4} \text{ г}$ находится в равновесии в однородном электрическом поле напряженностью 100 Н/Кл . Определите заряд капли (Кл).
A) 10^{-8} ; B) 10^{-6} ; C) 10^{-4} ; D) 10^{-3} .
4. Металлическому шару радиусом 2 см передали заряд $1,2 \text{ нКл}$. Определите напряженность электрического поля вблизи от поверхности шара (В/м).
A) 27; B) 18; C) 24; D) 9.
5. Металлическому шару радиусом 6 см передали заряд 24 нКл . Чему равна напряженность в точке на расстоянии 3 см от центра шара (В/м)?
A) 45; B) 90; C) 60; D) 0.
6. На поверхности шара радиусом 12 см равномерно распределен положительный заряд $0,18 \text{ мКл}$. Определите потенциал поля в центре шара (В).
A) 90; B) 60; C) 120; D) 180.
7. Во сколько раз изменится потенциальная энергия взаимодействия между двумя точечными зарядами, если уменьшить расстояние между ними в 9 раз?
A) увеличится в 9 раз; B) уменьшится в 9 раз;
C) увеличится в 3 раза; D) уменьшится в 3 раза.
8. При перемещении точечного заряда q между двумя точками с разностью потенциалов 100 В , а выполненная работа равная 5 мДж . Определить величину заряда (мКл)?
A) 20; B) 5; C) 500; D) 50.

**Основные понятия, правила и законы,
изученные в главе VII**

Закон сохранения зарядов	Алгебраическая сумма зарядов всех тел внутри любой закрытой системы не меняется, т.е.: $q_1 + q_2 + \dots + q_n = \text{const.}$
Силовые линии электрического поля	Линии, показывающие направления силы, действующие со стороны поля на положительный заряд, введенный в электрическое поле. Силовые линии электрического поля, образованного положительным зарядом, направлены от заряда, а в случае отрицательного заряда – направлены к нему.
Напряженность электрического поля	Напряженность электрического поля – векторная физическая величина, характеризующая электрическое поле в данной точке и численно равная отношению силы F , действующей на неподвижный заряд, помещенный в данную точку поля, к величине этого заряда q : $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}$
Напряженность поля, создаваемого точечным зарядом q на расстоянии r .	$E = k \frac{ q }{r^2}.$
Принцип суперпозиции электрического поля.	Напряженность электростатического поля, создаваемого в данной точке системой зарядов, равна векторной сумме напряженностей полей, создаваемых в этой точке каждым зарядом в отдельности: $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \dots + \vec{E}_n.$
Напряженность электрического поля в точках внутри заряженного шара (сферы) и за его пределами	$E = 0;$ $E = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2}.$

Поляризация диэлектрика.	Деформация электронной оболочки атомов (молекул) диэлектрика под воздействием электрического поля, в результате чего центры положительных и отрицательных зарядов атома не накладываются друг на друга.
Диэлектрическая восприимчивость.	$\varepsilon = \frac{E_0}{E}.$
Напряженность поля в точке на расстоянии r от точечного заряда, расположенного внутри диэлектрика.	$E = k \frac{ q }{\varepsilon \cdot r^2}.$
Потенциальная энергия $+q$ заряда, находящегося на расстоянии r от неподвижного положительного заряда Q	$W_{+q} = k \frac{Qq}{r}.$
Потенциал точечного заряда q .	$\varphi = k \frac{q}{\varepsilon \cdot r}.$
Электрическое напряжение.	$U = \varphi_1 - \varphi_2.$
Консервативная сила.	Сила, работа которой не зависит от траектории перемещения.
Объемная плотность энергии.	$w = \frac{W}{V} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon \cdot E^2}{2}.$

ГЛАВА VIII. ЗАКОНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Тема 35. ЭЛЕКТРОПРОВОДИМОСТЬ. ЗАВИСИМОСТЬ СИЛЫ ТОКА ОТ НАПРЯЖЕНИЯ

Из школьного курса физики за 8 класс известно, что для существования электрического тока должно выполняться три условия:

1. наличие источника тока;
2. наличие заряженных частиц, которые могут свободно двигаться по электрической цепи;
3. цепь должна быть замкнутой.

Также при изучении прохождения электрического тока в твердых телах, жидкостях и газах было введено понятие «электрическое сопротивление». За счет каких заряженных частиц существует электрический ток? Почему среда оказывает сопротивление прохождению электрического тока? Прежде чем ответить на эти вопросы, введем понятие электрической проводимости.

Величина, обратная электрическому сопротивлению, называется электропроводностью $\left(\frac{1}{R}\right)$. Единица измерения названа в честь немецкого ученого Э.Р. Сименса.

$$\gamma = \frac{1}{R}; \quad (8.1)$$

$$1 \text{ сименс} = 1 \text{ См} = \frac{1}{\text{Ом}}.$$

Изучение электропроводности металлов началось в начале XX века. В 1901 году немецкий ученый Карл Рикке составил цепь из трех цилиндров (два алюминиевых и один медный) и в течение одного года пропускал через нее ток (рис. 8.1). За год через цилиндр прошло суммарное количество заряда $3,5 \cdot 10^6$ Кл, но это не привело к изменению химического состава вещества цилиндров. После окончания эксперимента при

разъединении цилиндров определили, что их массы тоже не изменились. Следы переходов атомов не отличались от результатов простой диффузии. Эти эксперименты не смогли объяснить, благодаря каким частицам ток проходит в металлах.

Американские физики Т. Стюарт и Р. Толмен провели следующий эксперимент. В данном эксперименте, проведенном в 1916 году, использовали катушку с большим числом витков тонкой проволоки, которая приводилась в быстрое вращение (500 об/мин) вокруг своей оси. Концы катушки с помощью гибких проводов были присоединены к гальванометру. Раскрученная катушка резко тормозилась (рис. 8.2), и в цепи возникал кратковременный ток, обусловленный инерцией носителей заряда. Ученые экспериментально определили удельные заряды $\frac{q_0}{m}$ частиц, несущих ток. Значение удельного заряда равно $1,8 \cdot 10^{11}$ Кл/кг, что соответствует удельному заряду электрона.

Этот научный факт стал основой классической теории электропроводимости металлов.

В начале XX века немецкий физик П. Друде и голландский физик Х. Лоренц создали *классическую теорию электрической проводимости металлов*. Основная мысль этой теории заключается в следующем:

1. Причина высокой электрической проводимости металлов заключается в том, что в них имеется большое количество свободных электронов, приходящихся на единицу объема. Например, концентрация свободных электронов в меди составляет $8,4 \cdot 10^{23}$ м³. Электроны, как в газах, заполняют пространство между ионами решетки и двигаются беспорядочно и непрерывно. Если вычислить скорость беспорядочного движения электронов в металлах, она составит примерно 60–100 км/с. При отсутствии внешнего электрического поля из-за хаотичности движения электронов, проходящих через произвольные сечения проводника, электрический ток будет равен нулю.

2*. П. Друде и Х. Лоренц, используя электронную теорию проводимости, теоретическим путем вывели закон Ома для участка цепи.

Для этого рассмотрим проводник длиной l , с концентрацией электронов n и поперечным сечением S (рис. 8.3). Если на концы проводника подать

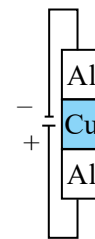


Рис. 8.1.

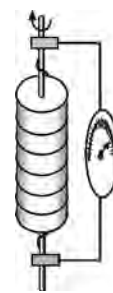


Рис. 8.2.

напряжение U , электроны наберут ускорение $a = \frac{eE}{m}$ под воздействием напряженности $E = \frac{U}{l}$ созданного поля. Скорость электрона через время t будет равна $v = \frac{eEt}{m}$, где t – время между двумя столкновениями электронов. При столкновениях изменяется направление скорости электрона, но средняя скорость не меняется.

$$v_{\text{cp.}} = \frac{eEt}{2m}. \quad (8.2)$$

По определению силы тока:

$$I = \frac{q}{t} = \frac{enV}{t} = \frac{enSl}{t} = enSv_{\text{cp.}} \quad (8.3)$$

Здесь, если учитывать (8.1), имеем,

$$I = \frac{ne^2t}{2m_e} \frac{S}{l} U \quad (8.4)$$

Величина $\gamma = \frac{ne^2t}{2m_e} \frac{S}{l}$ называется электрической проводимостью. Если учесть, что $\gamma = \frac{1}{R}$ является проводимостью, получаем выражение для электрического сопротивления: $R = \frac{2m_e}{ne^2t} \frac{l}{S}$.

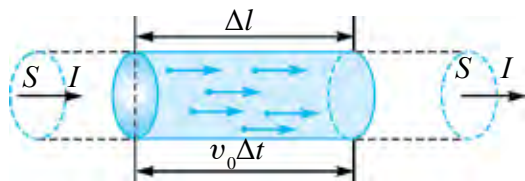


Рис. 8.3

Здесь $\frac{2m_e}{ne^2t} = \rho$ называется удельным сопротивлением. Под удельным сопротивлением понимается сопротивление проводника длиной 1 м и поперечным сечением 1 м².

Таким образом:

Сила тока для участка цепи прямо пропорциональна напряжению на концах проводника и электрической проводимости.

$$I = \gamma \cdot U. \quad (8.5)$$

Эта зависимость была найдена экспериментальным путем в начале XIX века немецким физиком Г. Оммом. Обычно такая зависимость выражается в виде:

$$I = \frac{U}{R}. \quad (8.6)$$

На рисунке 8.4 приводится зависимость силы тока, проходящего через два металлических проводника, от напряжения, приложенного на концах проводника при постоянной температуре.

График зависимости силы тока, протекающего через электронный прибор, от приложенного напряжения называется вольт-амперной характеристикой (ВАХ).

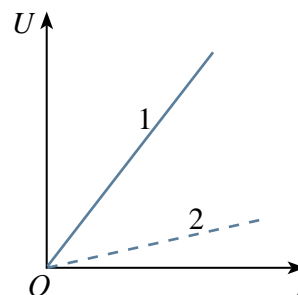


Рис. 8.4.

Величина удельной электрической проводимости материалов имеет важное значение при изготовлении электротехнического оборудования, используемого в промышленности и народном хозяйстве. Металл для электрических кабелей выбирается в зависимости от его электропроводности. Если металл подобран неправильно, кабель при прохождении тока может сильно нагреваться, что, в свою очередь, послужит причиной пожара.

Металлом, обладающим самой большой электрической проводимостью, является серебро. Удельная электрическая проводимость серебра при температуре 20⁰С равна 63,3 МСм/м. Изготовление электрических проводников из серебра обходится дорого, поэтому на практике используют медь, стоящую на втором месте по величине удельной электрической проводимости. Ее удельная электрическая проводимость равна 58,14 МСм/м. Медные проводники широко применяются в быту и промышленности. Благодаря высокой температуре плавления, медь выдерживает высокие электрические нагрузки и при этом долго служит.

Алюминиевые проводники стоят на втором месте после меди по частоте использования. Удельная электропроводность алюминия при 20⁰ С равна 35,71 МСм/м. Температура плавления алюминия примерно в два раза ниже, чем у меди и алюминиевые проводники менее выносливы к нагрузкам.

Из сплавов с низким удельным сопротивлением (нихром 0,9 МСм/м, фехрал 0,77 МСм/м), изготавливают спирали для электронагревательных приборов.

Для измерения удельного сопротивления или удельной электрической проводимости используют прибор, который называется *кондуктометр*. С помощью кондуктометра контролируется качество воды, конденсата или пара. Область его применения – фармакология, медицина, биохимия, биофизика, химическая технология, пищевая промышленность и т.д.

В электролитах удельная электрическая проводимость зависит от температуры и концентрации раствора, природы электролита. Удельная электрическая проводимость электролитических растворов (в отличие от металлов) увеличивается с ростом температуры. С повышением концентрации в электролитических растворах удельная электрическая проводимость сначала растет, затем, после достижения максимального значения, начинает уменьшаться.



1. В результате упорядоченного движения каких частиц в металлах появляется электрический ток?
2. В промышленности используются материалы с высокой или низкой электропроводимостью?
3. Дайте определение вольт-амперной характеристики прибора?

Тема 36. СИЛА ТОКА И ПЛОТНОСТЬ ТОКА. ДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА.

Если через поперечное сечение проводника за равные промежутки времени в равном количестве протекают заряды, считается, что через проводник проходит постоянный ток.

Физическая величина, измеряемая отношением количества зарядов, протекающих через поперечное сечение проводника, к промежутку времени течения заряда, называется силой тока:

$$I = \frac{q}{t}. \quad (8.7)$$

Одной из основных характеристик электрического тока является плотность тока (j). Плотностью тока называется физическая величина, измеряемая отношением силы тока I к площади поперечного сечения S , перпендикулярного к течению тока:

$$j = \frac{I}{S}. \quad (8.8)$$

Единица измерения плотности тока $\frac{\text{А}}{\text{м}^2}$.

Силу тока можно выразить в виде

$$I = nev_{\text{ср.}} S$$

Здесь: n – концентрация носителей заряда; e – заряд электрона; $v_{\text{ср.}}$ – средняя скорость упорядоченного движения заряженных частиц; S – поперечное сечение проводника, проводящего ток.

В таком случае плотность тока:

$$j = \frac{I}{S} = \frac{nev_{\text{ср.}}S}{S} = nev_{\text{ср.}} \quad (8.9)$$

Произведение ne характеризует плотность заряда (заряд в единице объема). Отсюда следует: $j = r_e v_{\text{ср.}}$.

Плотность тока является векторной величиной, которая направлена в соответствии со скоростью ($v_{\text{ср.}}$) положительной частицы.

Плотность тока в проводнике показывает, на сколько проводник загружен электрической энергией. Чтобы сэкономить и не допустить лишнего перерасхода в проводнике, нужно выбирать оптимальную плотность тока.

Хотя материал проводника не влияет на величину плотности тока, в технике выбор делают по удельному сопротивлению и длине проводника. Проводники, используемые в бытовых целях, выбирают для экономного режима тока.

Применяемые в жилых домах провода не должны быть длинными, и для экономии плотности тока берутся в пределах 6–15 А/мм². Медный провод диаметром 1,78 мм² (2,5 мм²) с изоляцией из ПВХ, размещенный под штукатуркой стены, может выдержать ток силой 30 А и даже 50 А.

На линиях передачи электричества используется экономная плотность тока примерно 1–3,4 А/мм². В электрических машинах, работающих в промышленных частотах (50 Гц) и трансформаторах это значение лежит в пределах от 1 до 10 А/мм².

При изучении электрического тока в жидкостях вы узнали, что электроды нагреваются. Значит, при прохождении электрического тока в некоторых средах происходят химические изменения. Также при прохождении тока проводники нагреваются. Значит, электрический ток оказывает тепловое воздействие. Это явление широко используют в бытовой технике и в промышленности.

Появление магнитного поля вокруг проводника, когда через него проходит ток, первым обнаружил ученый из Дании Ханс Кристиан Эрстед в 1820 году. Позднее французский ученый Андре Мари Ампер открыл взаимодействие токопроводящих проводников. Дальнейшие исследования показали, что взаимодействие проводников с током происходит через магнитное поле. Изучение магнитного действия тока привело к бурному развитию электротехники. Следует отметить, что при прохождении тока через металлы, электролиты, газы и полупроводники отмечается магнитное воздействие тока.

При прохождении тока через металлы химическое воздействие не наблюдается.

Образец решения задачи.

Через проводник диаметром 1 мм проходит ток 5 А. Вычислите плотность тока проводника.

Дано:	Формула:	Решение:
$D = 1 \text{ мм}$ $I = 5 \text{ А}$	$j = \frac{I}{S}$	$S = \frac{3,14 \cdot 1^2}{4} = 0,785 \text{ мм}^2.$
Найти: $j = ?$	$S = \frac{\pi D^2}{4}$	$j = \frac{5 \text{ А}}{0,785 \text{ мм}^2} = 6,37 \frac{\text{А}}{\text{мм}^2}.$ <i>Ответ:</i> $6,37 \frac{\text{А}}{\text{мм}^2}.$



1. Что такое сила тока?
2. В чем заключается значение плотности тока для бытовой техники и промышленности?
3. Какие виды воздействия может оказывать электрический ток?

Тема 37. ЗАКОН ОМА ДЛЯ ПОЛНОЙ ЦЕПИ. КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ СИЛЫ ТОКА

При прохождении тока по проводнику он нагревается и выделяется определенное количество тепла. Значит, в соответствии с законом сохранения энергии, при перемещении свободных электронов по проводнику электростатическое поле выполняет работу. Однако если в электрической цепи выделяется энергия, то по закону сохранения энергии столько же энергии должно поступить в электрическую цепь. Возникает вопрос: в какой части цепи это происходит и в результате каких физических процессов энергия передается в электрическую цепь? Сначала выясним, может ли роль источника электрической энергии выполнять электростатическое поле?

Не может. Как описано в теме 33, при перемещении заряда в электростатическом поле по замкнутой траектории выполненная работа будет равна нулю. Следовательно, заряды не могут двигаться по замкнутому кругу только под воздействием электростатической силы.

Из вышесказанного следует, что на каком-то участке цепи на заряд должны действовать силы, которые называются *сторонними силами*. Они действуют на заряд внутри источника тока. Именно эти силы передают энергию в электрическую цепь.

В источнике тока под воздействием сторонних сил происходит разделение зарядов. В результате на одном полюсе источника накапливаются положительные заряды, а на втором полюсе отрицательные заряды. Между полюсами возникает разность потенциалов.

В химических источниках тока сторонние силы имеют химическую природу. Например, если цинковые и медные электроды опустим в серную кислоту, положительные ионы цинка покидают свой электрод чаще, чем положительные ионы меди. В результате между медными и цинковыми электродами появляется разность потенциалов: потенциал медного электрода будет больше потенциала цинкового. Медный электрод становится положительным полюсом источника тока, а цинковый электрод будет отрицательным полюсом.

Сторонние силы в источнике тока при перемещении свободных зарядов против сил электростатического поля выполняют работу $A_{ст}$.

Эта работа будет пропорциональна количеству зарядов q , перемещаемых по цепи за заданное время. Исходя из этого, отношение выполненной работы сторонних сил к количеству заряда не зависит ни от $A_{ст}$, ни от q и может считаться характеристикой источника тока. Физическая величина, равная отношению работы $A_{ст}$ сторонних сил при перемещении заряда q от отрицательного полюса источника тока к положительному к величине этого заряда, называется **электродвижущей силой источника (ЭДС)** и обозначается буквой \mathcal{E} :

$$\mathcal{E} = \frac{A_{ст}}{q}. \quad (8.9)$$

ЭДС, как и напряжение, измеряется в вольтах.

Если сила тока в цепи будет равна I , за время t по цепи проходит заряд: $q = It$. Исходя из этого, формулу (8.9) запишем следующим образом:

$$A_{ст} = \mathcal{E} It. \quad (8.10)$$

За это время внутри источника тока и во внешней цепи выделяется количество тепла

$$Q_{внут} = I^2 r t \quad \text{и} \quad Q_{внеш} = I^2 R t \quad (8.11)$$

Здесь r – является сопротивлением источника и называется внутренним сопротивлением.

Согласно закону сохранения энергии:

$$Q_{внеш} + Q_{внут} = A_{ст}. \quad (8.12)$$

После выполнения соответствующих действий, подставляя формулы (8.9), (8.10) и (8.11) в (8.12), получим выражение

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R+r} \quad (8.13)$$

Это выражение называется законом Ома для всей цепи.

Величина $(R + r)$ называется полным сопротивлением цепи.

Закона Ома для всей цепи запишем в виде:

$$\mathcal{E} = IR + Ir. \quad (8.14)$$

Первое слагаемое в этом выражении равно напряжению полюсов источника:

$$IR = U.$$

Максимальное напряжение на полюсах источника равно \mathcal{E} . Это происходит при $I = 0$. Когда к внешней цепи не подсоединено сопротивление, сила тока равняется нулю. В этом случае

$$U_{\max} = \mathcal{E}.$$

Минимальное напряжение между полюсами источника равно нулю. В случае, когда происходит короткое замыкание, т.е. $R = 0$, сила тока будет максимальной:

$$I_{\text{кз}} = \frac{\mathcal{E}}{r}. \quad (8.15)$$

Это называют *током короткого замыкания*.

Выполненная работа на внешней цепи называется полезной работой. Ее запишем буквой $A_{\text{полез}}$. Используя формулу работы, выполненной током, получим

$$A_{\text{полез}} = I^2 R t$$

Учитывая, что

$$A_{\text{ст}} = I^2 R t + I^2 r t,$$

найдем отношение полезной работы к работе выполненной внешними силами:

$$\eta = \frac{A_{\text{полез}}}{A_{\text{ст}}} = \frac{I^2 R t}{I^2 R t + I^2 r t} = \frac{R}{R+r}. \quad (8.16)$$

Это отношение, выраженное в процентах, называется КПД источника тока.



1. Почему электростатическое поле не может служить источником энергии электрической цепи?
2. Что означает понятие «сторонние силы»?
3. Что такое электродвижущая сила?
4. Какое явление называется коротким замыканием?

Тема 38. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ И ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ ТОКА.

Электродвижущая сила химических источников тока невелика. Так, ЭДС элемента Даниэля, входящего в группу гальванических элементов, составляет 1,11 В, ЭДС элемента Лекланше – 1,4 В. Сразу после зарядки ЭДС кислотного аккумулятора равна 2,7 В, щелочного – 1,3 В.

Для эксплуатации многих разновидностей технического оборудования требуется высокое напряжение. Например, для пуска двигателя автомобиля требуется мощный источник постоянного тока напряжением 12 В. Для этого необходимо параллельно соединить несколько элементов питания или аккумуляторов.

При вычислении силы тока и напряженности в создаваемой цепи при последовательном или параллельном соединении источников тока пользуются правилами Кирхгофа.

Точка, где встречаются как минимум три проводника с током, называется узлом. Принято считать, что направление тока, входящего в узел, положительное, а направление тока, выходящего из узла, отрицательное (рис. 8.5).

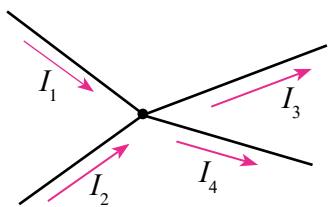


Рис. 8.5.

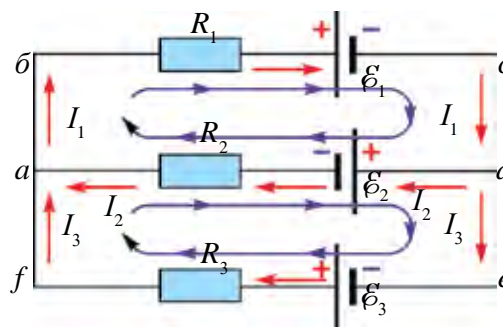


Рис. 8.6.

Первое правило Кирхгофа. Алгебраическая сумма сил токов во входящих в узел и выходящих из узла проводниках равна нулю:

$$I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n = 0. \quad (8.17)$$

В разветвленной цепи всегда можно выделить несколько замкнутых путей по направлению тока. Такие замкнутые пути называются контурами. На разных участках выделенного контура ток может проходить по-разному. На рисунке 8.6 приводится простая разветвленная цепь.

Второе правило Кирхгофа. Алгебраическая сумма перепадов напряжения в узлах закрытого контура равна алгебраической сумме ЭДС в контуре:

$$\begin{aligned} I_1 R_1 + I_2 R_2 &= -\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2; \\ -I_2 R_2 + I_3 R_3 &= \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2; \\ I_1 + I_2 + I_3 &= 0. \end{aligned} \quad (8.18)$$

При расчете источников тока направление внешних сил считается положительным.

Используя эти правила, попробуем соединить источники тока последовательно и параллельно.

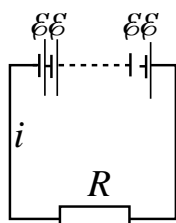


Рис. 8.7.

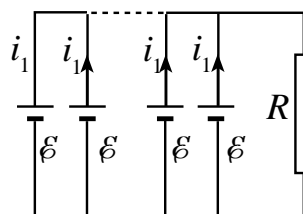


Рис. 8.8.

Для упрощения задачи значение ЭДС всех соединяемых элементов \mathcal{E} и внутреннего сопротивления r будем считать одинаковыми.

1. Соединив элементы в количестве n штук, изготовим батарею (рис. 8.7). Соединим ее с внешним сопротивлением R . Применим второе правило Кирхгофа к закрытому контуру:

$$n\mathcal{E} = I_1 R + n I r.$$

Отсюда

$$I = \frac{n\mathcal{E}}{R + nr}. \quad (8.19)$$

Это означает, что *общая ЭДС батареи при последовательном соединении элементов в количестве n штук увеличивается в n раз.*

Такое соединение эффективно, когда внешнее сопротивление многократно больше, чем внутреннее сопротивление. Действительно, когда $R \gg nr$, в формуле 8.19 значением nr относительно R можно пренебречь. Тогда

$$I \approx \frac{n\varepsilon}{R},$$

т.е. при последовательном соединении элементов в количестве n штук сила тока в цепи будет в n раз больше.

2. Построим цепь путем параллельного соединения элементов в количестве n штук (рис.8.8) и соединим с внешним сопротивлением. Применим оба правила Кирхгофа к закрытому контуру.

$$I = nI_1, \quad \varepsilon = IR + I_1 r$$

Здесь I_1 – сила тока, проходящая через один элемент. Отсюда

$$I = \frac{\varepsilon}{R + \frac{r}{n}}. \quad (8.20)$$

Значит, при изготовлении батарейки путем параллельного соединения n штук элементов, *общая ЭДС не меняется, а внутреннее сопротивление уменьшается в n раз.*

Параллельное соединение дает хорошую эффективность, когда внешнее сопротивление меньше, чем внутреннее сопротивление. При $R \ll nr$ формулу (8.25) можно записать в виде:

$$I \approx n \frac{\varepsilon}{r}.$$

Это означает, что *общая сила тока в n раз больше, чем сила тока одного элемента.*

На практике встречаются случаи, когда ЭДС элемента и внутреннее сопротивление разные.

Рассмотрим случай, когда между собой соединены полюса источника с одинаковыми знаками. На рисунке 8.9 приводится электрическая схема, когда

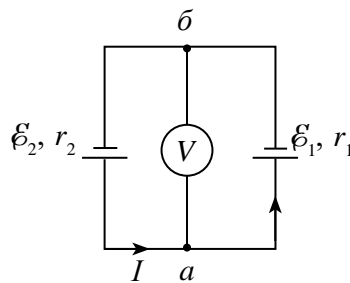


Рис. 8.9.

соединены полюса с одинаковыми знаками двух элементов, внутреннее сопротивление которых равно r_1 и r_2 , а ЭДС равна \mathcal{E}_1 и \mathcal{E}_2 . Что покажет вольтметр, подсоединенный к схеме в точках a и b ? Здесь считается, что внутреннее сопротивление вольтметра гораздо больше, чем внутренние сопротивления элементов.

Если $\mathcal{E}_1 > \mathcal{E}_2$, направление тока будет таким, как показано на рис.8.9. Из-за того, что внутреннее сопротивление вольтметра большое, не будем учитывать проходящий через него ток. Согласно второму правилу Кирхгофа, потенциальные перепады на внутренних сопротивлениях равны сумме ЭДС элементов

$$Ir_1 + Ir_2 = \mathcal{E}_2 - \mathcal{E}_1. \quad (8.21)$$

Применение знака минус в этой формуле означает, что элементы в цепи создают противоположно направленные токи. Здесь сила тока, проходящего через цепь, равняется:

$$I = \frac{\mathcal{E}_2 - \mathcal{E}_1}{r_1 + r_2} \quad (8.22)$$

Вольтметр покажет значение, равное

$$U = \mathcal{E}_1 + Ir_1 = \frac{\mathcal{E}_2 r_1 + \mathcal{E}_1 r_2}{r_1 + r_2}. \quad (8.23)$$

Образец решения задачи.

ЭДС двух источников тока соответственно равны 2 В и 1,5 В, их внутренние сопротивления 0,4 Ом и 0,6 Ом, и они соединены как показано на рисунке 8.9. Определите напряжение между точками a и b .

Дано:	Формула:	Решение:
$r_1 = 0,6 \text{ Ом}$ $r_2 = 0,4 \text{ Ом}$ $\mathcal{E}_1 = 2 \text{ В}$ $\mathcal{E}_2 = 1,5 \text{ В}$	$U = \frac{\mathcal{E}_2 r_1 + \mathcal{E}_1 r_2}{r_1 + r_2}$	$U = \frac{1,5 \text{ В} \cdot 0,4 \text{ Ом} + 2 \text{ В} \cdot 0,6 \text{ Ом}}{0,4 \text{ Ом} + 0,6 \text{ Ом}} = 1,8 \text{ В.}$
Найти: $U = ?$		<i>Ответ:</i> $U = 1,8 \text{ В.}$



1. При расчетах каких цепей можно пользоваться правилами Кирхгофа?
2. В каких случаях выгодно последовательное соединение источников тока?
3. В каких случаях источники тока соединяются параллельно?

Тема 39. РАСШИРЕНИЕ ПРЕДЕЛОВ ИЗМЕРЕНИЯ АМПЕРМЕТРА И ВОЛЬТМЕТРА

Электроизмерительные приборы, применяемые в электрических цепях, могут работать в определенных пределах. Например, гальванометр является очень чувствительным прибором, и он может измерить очень маленькие силы тока и напряжения. Чтобы увеличить предел измерения прибора, к нему дополнительно устанавливают сопротивление.

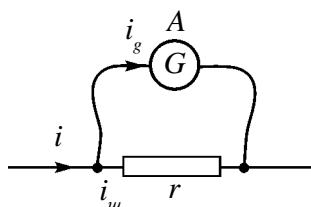


Рис. 8.10.

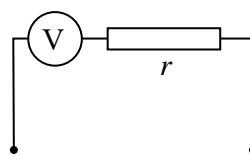


Рис. 8.11.

Чтобы использовать гальванометр как амперметр, к нему параллельно подключается маленькое сопротивление, которое называется шунтом (рис. 8.10).

Сопротивление гальванометра обозначим R , сопротивление шунта – r . Гальванометр и шунт между собой соединены параллельно, и на их концах напряжение будет равно U . Тогда силы тока, проходящие через гальванометр и шунт, определяются следующими соотношениями:

$$I_g = \frac{U}{R} \text{ и } I_u = \frac{U}{r}$$

Пусть общая сила тока в цепи I в n раз превышает силу тока, проходящего через гальванометр I_g :

$$I = n \cdot I_g; \quad \frac{I_u}{I_g} = \frac{R}{r} = n$$

Сила тока в цепи будет равна: $I = I_g + I_u = I_g n + I_g = I_g (n + 1)$, или

$$\frac{I_g}{I} = \frac{1}{n+1}.$$

Таким образом, сила тока, проходящего через гальванометр, будет в $n+1$ раз меньше, чем общая сила тока. Через выражение силы тока находим сопротивление шунта, подсоединенного к гальванометру:

$$\frac{U}{R}(n-1) = \frac{U}{r}, \quad \boxed{r = \frac{R}{n-1}}. \quad (8.24)$$

Таким образом, если подсоединить к гальванометру шунт с сопротивлением r , предел измерения гальванометра увеличится в n раз и степень деления на шкале прибора увеличится в $n+1$ раз.

Чтобы применить гальванометр в качестве вольтметра, к нему последовательно подсоединяют дополнительное сопротивление (рис. 8.11). Здесь также обозначим, что сопротивление гальванометра R , дополнительного сопротивления r . Вследствие последовательного соединения гальванометра и дополнительного сопротивления сила тока, проходящего через них, будет одинакова: $I = I_z = I_{ш}$. Из-за последовательного соединения R и r , общее напряжение будет равно:

$$U = I(R + r) = IR + I \cdot r$$

Отношение общего напряжения в цепи U к U_z , обозначим как

$$n = \frac{U}{U_r}.$$

Здесь U_r – предел измерения напряжения гальванометром. Если обе стороны уравнения напряжения разделить на U_z , получим: $n = 1 + \frac{r}{R}$.

Отсюда

$$\boxed{r = R(n-1)}. \quad (8.25)$$

Значит, если к гальванометру последовательно подсоединить сопротивление r , то предел измерения напряжения увеличится в n раз. В этом случае степень деления шкалы увеличится в $(n+1)$ раз.

Обычно вольтметры для измерения высокого напряжения работают по такому принципу.

Образец решения задачи.

1. Амперметр, соединенный с шунтом сопротивлением 0,04 Ом, показал 5 А, когда его подсоединили к узлу. Внутреннее сопротивление амперметра 0,12 Ом. Найдите силу тока в неразветвленной части цепи.

Дано:	Формула:	Решение:
$r = 0,04 \text{ Ом}$	$r = \frac{R}{n-1}$,	$n = \frac{0,12 \text{ Ом}}{0,04 \text{ Ом}} + 1 = 3 + 1 = 4;$
$I_A = 5 \text{ А}$	$n = \frac{R}{r} + 1$	$I = 4 \cdot 5 \text{ А} = 20 \text{ А}.$
$R_A = 0,12 \text{ Ом}$	$I = nI_A$	
Найти:		
$I = ?$		<i>Ответ:</i> 20 А.



1. Как выбирается шунт к амперметру?
2. Как выбирается дополнительное сопротивление для подключения к вольтметру?
3. Что происходит, если дополнительное сопротивление подключено к вольтметру параллельно?

Тема 40. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА: ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭДС И ВНУТРЕННЕГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ИСТОЧНИКА ТОКА

Цель работы: Определение электродвижущей силы и внутреннего сопротивления источника тока с помощью амперметра и вольтметра.

Необходимые принадлежности: 1) лабораторный универсальный источник тока или аккумуляторная батарейка; 2) амперметр; 3) вольтметр; 4) переключатель; 5) проводники; 6) сопротивления 10 Ом, 20 Ом.

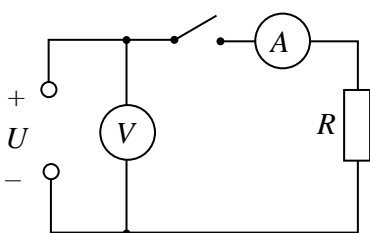


Рис. 8.12.

Выполнение работы.

1. Собирается электрическая цепь, приведенная на рис. 8.12. К цепи подключается сопротивление 10 Ом.
2. Записывается показание вольтметра U_B при выключенном переключателе. Берется как $U = \mathcal{E}$.
3. Включается переключатель и записывается показание амперметра I_A .
4. Результаты заносятся в таблицу.

Опыт №	U_B, V	U_2, B	I_A, A	\mathcal{E}, B	r, Om
1.					
2.					

5. Вычисляется внутреннее сопротивление по формуле: $r = \frac{\mathcal{E} - U_2}{I}$ и результат заносится в таблицу.
6. Опыт повторяется при подключении к цепи сопротивления 20 Ом.
7. Сравните полученные в первом и втором опыте значения r_1 и r_2 .



1. Какую часть электрической цепи называют внутренней и какую часть внешней цепью?
2. Что понимается под ЭДС источника?
3. За счет чего появляется внутреннее сопротивление источника?

Упражнение 8

1. ЭДС батареи равна 1,5 В. Когда ее соединили с внешним сопротивлением 3 Ом, напряжение на клеммах батареи было 0,95 В. Чему равно внутреннее сопротивление батареи?

2. ЭДС батареи в электрической цепи равна 30 В, сила тока равна 3 А. Напряжение на клеммах батареи 18 В. Определите внутреннее сопротивление батареи и сопротивление внешней цепи.

3. При соединении источника тока с сопротивлением 5 Ом сила тока цепи равна 5 А, при соединении с сопротивлением 2 Ом равна 8 А. Найдите внутреннее сопротивление и ЭДС источника. (Ответ: 3 Ом; 40 В).

4. ЭДС элемента источника тока 1,5 В. Ток короткого замыкания 30 А. Чему равно внутреннее сопротивление элемента? Если элемент соединить с катушкой сопротивлением 1 Ом, чему будет равно напряжение на полюсах элемента?

5. Если внешнее сопротивление, подключенное к батарее, увеличить в n раз, напряжение увеличится от U_1 до U_2 . Чему равна ЭДС батареи? (Ответ: $\mathcal{E} = U_1 \cdot U_2 (n-1) / (U_1 n - U_2)$).

6. При каких условиях напряжение на клеммах батареи может быть больше, чем его ЭДС?

7. Элементы с ЭДС \mathcal{E}_1 и \mathcal{E}_2 соединены параллельно. Найдите разницу потенциалов между клеммами элементов, если их внутренние сопротивления равны.

8. Элементы с ЭДС равными 1,5 В и 2 В соединены одинаковыми полюсами. Вольтметр, подключенный к клеммам, показал напряжение 1,7 В. Найдите отношение внутренних сопротивлений элементов (Ответ: $r_1/r_2 = 2/3$).

9. Внутренние сопротивления элементов с ЭДС 1,3 В и 2 В соответственно равны 0,1 Ом и 0,25 Ом. Они соединены параллельно. Найдите силу тока в цепи и напряжение на клеммах элементов.

10. Вольтметр имеет четыре предела измерения: 3, 15, 75, 150 В. Сила тока, которая может проходить через прибор, равна 0,8 мА. Если внутреннее сопротивление вольтметра будет 1000 Ом, найдите дополнительные сопротивления R_1 , R_2 , R_3 и R_4 , которые подключаются к нему. (Ответ: 9, 49, 249 и 499 кОм).

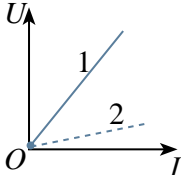
11. Стрелка гальванометра с внутренним сопротивлением 200 Ом при силе тока 100 мкА отклоняется до конца шкалы. Какое сопротивление необходимо последовательно подсоединить к гальванометру, чтобы он мог работать как вольтметр и измерить напряжение до 2 В?

Тестовые вопросы по итогам главы VIII

1. В каких единицах измеряется электродвижущая сила источника тока?
А) Н; В) Дж; С) А; D) В.
2. ЭДС источника равна 12 В. Найдите выполненную работу (Дж) внешних сил при перемещении заряда 50 Кл внутри источника от одного полюса до другого?
А) 60; В) 50; С) 330; D) 600.
3. Кто первым создал классическую теорию электрической проводимости металлов?
А) П. Друде и голландский физик Х. Лоренц; В) Э.Р. Сименс;
С) К. Рикке; D) Т. Стюарт и Р. Толмен.
4. Каким должно быть сопротивление шунта и способ его подсоединения к амперметру? R_A – сопротивление амперметра, r – сопротивление шунта.
А) если $R_A > r$, соединяется параллельно;
В) если $R_A > r$, соединяется последовательно;
С) если $R_A < r$, соединяется последовательно;
D) если $R_A < r$, соединяется параллельно.
5. Каким должно быть сопротивление шунта и способ его подсоединения к вольтметру?
А) если $R_v > r$, соединяется параллельно;
В) если $R_v > r$, соединяется последовательно;
С) если $R_v < r$, соединяется последовательно;
D) если $R_v < r$, соединяется параллельно.
6. Электрическая цепь состоит из резистора с сопротивлением 4 Ом и источника тока с ЭДС 12 В и внутренним сопротивлением 2 Ом. Определите падение напряжения резистора в вольтах?
А) 8; В) 2; С) 4; D) 12.
7. Дополните предложение. При изготовлении батарейки из n элементов, соединенных, общая ЭДС в n раз.
А) ... последовательно ... увеличится
В) ... последовательно ... уменьшится
С) ... последовательно ... не изменится
D) ... параллельно ... увеличится

8. Дополните предложение. При изготовлении батареек соединением n элементов общая ЭДС, внутреннее сопротивление в n раз.....
- А) ... параллельным ... не меняется ... уменьшится.
 В) ... параллельным ... увеличится ... уменьшится.
 С) ... параллельным ... не изменится ... увеличится.
 D) ... последовательным ... не изменится ... уменьшится.
9. При коротком замыкании источника тока с сопротивлением $0,01 \text{ Ом}$ сила тока была 1000 А . Найдите ЭДС источника (В).
- А) 10; В) 9; С) 12; D) 15.
10. К батарееке с внутренним сопротивлением 2 Ом подключили внешнее сопротивление 50 Ом . Если ЭДС батарееки 12 В , найдите КПД (%).
- А) 92; В) 89; С) 96; D) 100.

Основные понятия, правила и законы, изученные в главе VIII

Условия существования электрического тока	1. Наличие источника тока. 2. Наличие заряженных частиц, которые могут свободно перемещаться по токопроводящей цепи. 3. Замкнутость цепи.
Электрическая проводимость	Величина обратная электрическому сопротивлению.
Вольт-амперная характеристика (ВАХ)	График зависимости силы тока, проходящего через проводники и приборы, от напряжения. 
Плотность тока	Отношение силы тока (I) к площади поперечного сечения (S), перпендикулярной к направлению тока, $j = \frac{I}{S}$; $j = nev_{\text{сп}}$.
Электродвижущая сила (ЭДС)	$\mathcal{E} = \frac{A_{\text{ст}}}{q}$ – выполненная работа внешних сил при перемещении единичного заряда по замкнутой цепи. Единица измерения – 1 В.

Закон Ома для полной цепи	$I = \frac{\mathcal{E}}{R+r}.$
Ток короткого замыкания	$I_{кз} = \frac{\mathcal{E}}{r}$ – сила тока, когда внешнее сопротивление равно нулю.
КПД источника тока	$\eta = \frac{R}{R+r} \cdot 100 \text{ \%}.$
Первое правило Кирхгофа	Алгебраическая сумма сил токов во входящих в узел и выходящих из узла проводниках равна нулю: $I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n = 0.$
Второе правило Кирхгофа	Алгебраическая сумма перепадов напряжения в узлах закрытого контура равна алгебраической сумме ЭДС в контуре: $I_1 R_1 + I_2 R_2 + \dots + I_n R_n = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_n.$
Изготовление батарейки последовательным соединением n элементов	$I = \frac{n\mathcal{E}}{R+nr}.$ При изготовлении батарейки последовательным соединением n элементов общая ЭДС увеличится в n раз.
Изготовление батарейки параллельным соединением n элементов	$I = \frac{\mathcal{E}}{R + \frac{r}{n}}$ При изготовлении батарейки параллельным соединением n элементов, общая ЭДС уменьшится в n раз.
Шунт	Сопротивление с малым значением, подключаемое параллельно к прибору, для увеличения пределов измерения амперметра, $r = \frac{R}{n-1}.$
Дополнительное сопротивление	Сопротивление с большим значением, подсоединяемое последовательно к прибору, для увеличения пределов измерения вольтметра, $r = R(n-1).$

ГЛАВА IX. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В РАЗЛИЧНЫХ СРЕДАХ

Тема 41. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ВАКУУМЕ

Для изучения электрического тока в вакууме в стеклянную или металлическую колбу устанавливают два электрода на определенном расстоянии друг от друга. Воздух должен быть так откачан, чтобы при движении между электродами молекулы не сталкивались. Для этого остаточное давление воздуха в колбе должно быть в пределах $p \ll 10^{-13}$ мм.рт.ст.

Один из электродов будем называть анодом (A) и его соединим с положительным полюсом источника. Второй будет катодом (K) и его соединим с отрицательным полюсом источника (рис. 9.1).

Когда между анодом и катодом приложим напряжение, подключенный к цепи чувствительный гальванометр покажет отсутствие тока в цепи. Это значит, что в вакууме не существуют заряженные частицы, переносящие ток.

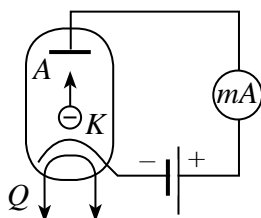


Рис. 9.1.

Чтобы появились заряженные частицы, нужно нагреть катод с помощью специального нагревателя (Q). Нагреватель изготавливается в форме спирали, и через него пропускают электрический ток.

Явление выбивания электрона в результате нагревания металлов называется термоэлектронной эмиссией.

При нагревании катода на электроны, вылетевшие из него, действует электрическое поле, имеющееся между анодом и катодом. В результате электроны из катода к аноду двигаются с ускорением. Подключенный к цепи гальванометр регистрирует наличие тока.

Теперь анод подсоединим к отрицательному полюсу источника тока, а катод подсоединим к положительному полюсу. В этом случае стрелка гальванометра не отклоняется, т.е. по цепи не проходит ток.

Электрический ток в вакууме состоит из упорядоченного потока электронов.

Вакуумная лампа, состоящая из анода и катода, называется **двухэлектродная электронная лампа – диод.**

Свойства любого электронного прибора характеризуются его *вольт-амперной характеристикой*, т.е. зависимостью силы тока, проходящего через прибор, от напряжения, приложенного к нему.

Для изучения вольт-амперной характеристики диода на его нагреватель подается постоянное напряжение 4 В. В результате горячий нагреватель сохраняет постоянную температуру T_1 . Когда напряжение между анодом и катодом равно нулю, электроны, выбитые из горячего катода, образуют вокруг катода электронное облако. С ростом напряжения анода электроны в электронном облаке начинают двигаться в сторону анода, и электронное облако начинает рассеиваться. Здесь с ростом напряжения растет и ток анода (рис. 9.2). В вольт-амперной характеристике это приходится на область 1. Затем рост напряжения не оказывает заметного влияния на увеличение анодного тока и в характеристике это приходится на область 2. В это время все электроны, покидающие катод, достигают анода, и анодный ток остается без изменения. Анодный ток в это время называется током насыщения.

Если повторить опыт с напряжением нагревателя 6 В, его температура будет T_2 . При этом увеличится значение тока насыщения. Как видно из характеристики, зависимость силы тока от напряжения нелинейная. В области 1 характеристики зависимости силы тока от напряжения подчиняется следующей закономерности

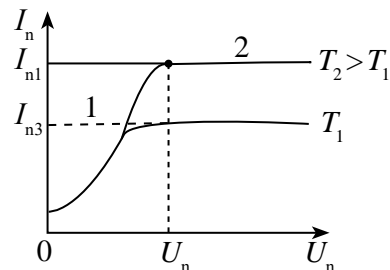


Рис. 9.2.

$$I_a = kU^{3/2} \quad (9.1)$$

Это формула называется формулой **Богуславского – Ленгмюра.**

До появления мощных полупроводниковых диодов для выпрямления переменного тока использовали вакуумные диоды.



1. Какое значение не должно превышать давление внутри электронной лампы для наблюдения электрического тока в вакууме?
2. Как создаются частицы - носители тока в вакууме?

3. Что такое электронное облако?
4. В каких целях можно использовать диод?

Тема 42. ЗАВИСИМОСТЬ СОПРОТИВЛЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПРОВОДНИКОВ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

Как зависит сопротивление металлических проводников от изменения температуры?

Давайте обсудим это. С одной стороны, рост температуры приведет к увеличению скорости свободных электронов и количеству их соударений. Кроме этого, увеличится амплитуда колебаний ионов в узлах кристаллической решетки и количество их соударений сдвигающимися электронами. В результате уменьшится скорость упорядоченного движения заряженных частиц, и это приведет к уменьшению силы тока.

С другой стороны, при повышении температуры увеличится количество свободных электронов в единице объема. Например, в электролитических растворах увеличится количество ионов.

В зависимости от того, какой фактор играет большую роль, повышение температуры приведет к увеличению или уменьшению сопротивления проводника.

Для проверки правильности этих рассуждений проведем следующий опыт. Последовательно к электрической лампочке соединен стальной провод в форме спирали (рис. 9.3).

Сначала лампочка горит ярко. Если спираль нагреть, то яркость лампочки падает. Если к ним последовательно соединить амперметр, он

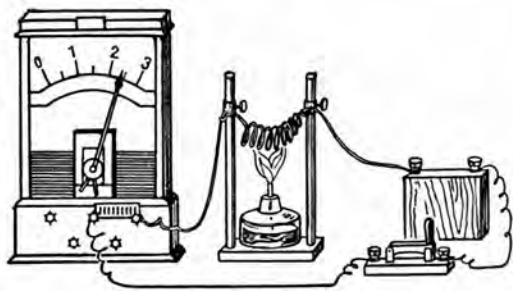


Рис. 9.3

покажет, что сила проходящего тока уменьшилась. Этот опыт показывает, что при нагревании спирали увеличивается ее сопротивление. Такой же опыт можно провести с другими металлами и сплавами.

Значит, *при нагревании металлических проводников их сопротивление увеличивается.*

Если при 0°C значение сопротивления проводника равно R_0 , при температуре t равно R , зависимость между ними имеет вид

$$R = R_0(1 + \alpha\Delta t) \quad (9.2)$$

Здесь α – температурный коэффициент сопротивления. Чтобы понять физический смысл этого, запишем

$$\alpha = \frac{R - R_0}{R_0\Delta t} = \frac{\Delta R}{R_0\Delta t} \quad (9.3)$$

Значит, коэффициент α показывает, какую часть составляет изменение сопротивления проводника при изменении температуры на 1°C относительно сопротивления при 0°C . В точно работающих электронных схемах необходимо учитывать зависимость сопротивления проводника от температуры, иначе это может привести к появлению дополнительных ошибок.

При нагревании проводников их геометрические размеры изменяются мало. Сопротивление проводника в основном меняется с изменением удельного сопротивления. Для определения зависимости удельного сопротивления от температуры, в выражение (9.2) подставим: $R = \rho \frac{l}{S}$ и $R_0 = \rho_0 \frac{l}{S}$ и получим.

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha\Delta t). \quad (9.4)$$

В следующей таблице приводятся температурные коэффициенты удельного сопротивления некоторых металлов.

Металл или сплав	$\alpha, ^{\circ}\text{C}^{-1}$	Металл или сплав	$\alpha, ^{\circ}\text{C}^{-1}$
Алюминий	0,0042	Никелин	0,0001
Висмут	0,0046	Никель	0,0065
Вольфрам	0,0045	Ниобий	0,003
Железо	0,0062	Нихром	0,0002
Золото	0,0040	Олово	0,0044
Индий	0,0047	Платина	0,0039
Кадмий	0,0042	Ртуть	0,0010
Кобальт	0,0060	Свинец	0,0042
Медь	0,0039	Серебро	0,0040
Молибден	0,0050	Хром	0,0059
Натрий	0,0055	Хромал	0,000065
Нейзильбер	0,0003	Цинк	0,0042

Зависимость удельного сопротивления металлов от температуры используется в *термометрах сопротивления*. Такими термометрами можно измерять очень высокие и очень низкие температуры. Например, с помощью платиновых термометров можно измерять температуры от $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+600\text{ }^{\circ}\text{C}$ с точностью $0,0001\text{ }^{\circ}\text{C}$.

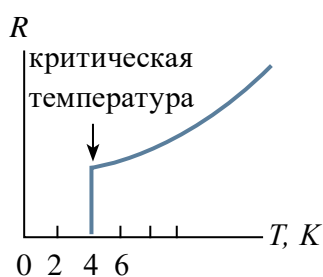


Рис. 9.4.

Таким образом, в металлах с понижением температуры сопротивление должно уменьшаться, а при абсолютно нулевой температуре должно равняться нулю. Однако, с другой стороны, при абсолютно нулевой температуре в результате стремления к нулю скорости свободных электронов сопротивление проводника должно быть бесконечно большим.

Правильность этих выводов нужно было проверить экспериментальным путем. В 1908 году голландский физик Камерлинг-Оннес первым смог получить жидкий гелий. Именно работая при температурах кипения жидкого гелия, Камерлинг-Оннес открыл явление сверхпроводимости. Сначала он проводил эксперименты с металлами, затем с ртутью. Эксперименты, проведенные с ртутью, дали неожиданные результаты. С понижением температуры сопротивление ртути уменьшается, и при температуре $4,15\text{ К}$ (ниже, чем температура кипения жидкого гелия) резко уменьшается и опускается до нуля (рис. 9.4). 28 апреля 1911 года Камерлинг-Оннес опубликовал свои результаты. Это явление он назвал *«сверхпроводимостью»*, однако теориями того времени это явление невозможно было объяснить. В 1912 году явление сверхпроводимости наблюдали уже в свинце и олове. В последующих исследованиях подобные явления наблюдались во множестве металлов и сплавов при температурах ниже 25 К . В 1957 году явление сверхпроводимости было теоретически обосновано Купером и Боголюбовым. В эксперименте, проведенном в 1957 году Коллинзом, в замкнутой цепи без источника тока в течение 2,5 лет непрерывно проводили ток. В 1986 году в металлокерамических материалах наблюдали процесс высокотемпературной (100 К) сверхпроводимости.

Образец решения задачи.

В спирали электрической лампочки, изготовленной из вольфрама, сопротивление при $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ равно 30 Ом . При соединении лампочки с

источником постоянного тока 220 В сила тока, проходящего через него, равнялась 0,6 А. Определите температуру спирали при свечении лампочки.

<p>Дано:</p> <p>$t = 20^\circ\text{C}$</p> <p>$R_1 = 30 \text{ Ом}$</p> <p>$U = 220 \text{ В}$</p> <p>$\alpha = 0,005 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$</p> <hr/> <p>Найти:</p> <p>$\Delta t - ?$</p>	<p>Формула:</p> $R = R_0(1 + \alpha \Delta t)$	<p>Решение:</p> $R_0 = \frac{30 \text{ Ом}}{1 + 0,005^\circ\text{C}^{-1} \cdot 20^\circ\text{C}} = 27 \text{ Ом};$ $R = \frac{220 \text{ В}}{0,6 \text{ А}} = 366,7 \text{ Ом} \approx 367 \text{ Ом};$ $\Delta t = \frac{367 \text{ Ом} - 27 \text{ Ом}}{27 \text{ Ом} \cdot 0,005^\circ\text{C}^{-1}} = 2518^\circ\text{C}.$ <p style="text-align: right;"><i>Ответ: 2518°C.</i></p>
---	--	--



1. Как меняется сопротивление металлов с повышением температуры?
2. Как используется зависимость изменения сопротивления металлов от температуры?
3. Каковы перспективы использования явления сверхпроводимости в промышленности и транспорте?

Тема 43. СОБСТВЕННАЯ ПРОВОДИМОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВ. ПРИМЕСНЫЕ ПРОВОДИМОСТИ

В природе существуют вещества, у которых количество электронов в единице объема меньше, чем в проводниках, но больше, чем у изоляторов (диэлектриков). Такие вещества называют полупроводниками.

В полупроводниковых веществах с повышением температуры их удельное сопротивление уменьшается. При очень низких температурах полупроводниковое вещество становится диэлектриком.

При воздействии света на металлы их электрическая проводимость почти не меняется. При попадании света на полупроводники их электрическая проводимость увеличивается.

Таким образом, основные отличительные черты полупроводников следующие:

а) по способности проведения электричества занимают промежуточное состояние между металлами и диэлектриками;

б) при нагревании и освещении уменьшается удельное сопротивление.

К элементам, обладающим полупроводниковыми свойствами, относятся германий, кремний, теллур, селен и др. Как вам известно из курса химии, полупроводниковые элементы по своим свойствам и атомному построению расположены в III, IV и V группе **периодической системы химических элементов Д.И. Менделеева**.

Структура полупроводников. Собственная проводимость.

Чтобы понять природу электрического тока в полупроводниках, нужно знать их структуру. Для этого рассмотрим кристалл чистого кремния, в составе которого нет никакого инородного вещества. В 9-классе вы познакомились со строением атомов и узнали, что электроны в атоме расположены по оболочкам.

В атоме кремния при послойном расположении электронов на внешней оболочке располагаются четыре электрона. Соседние атомы связаны друг с другом с помощью этих электронов.

Каждый атом связан с другим атомом общей парой электронов по одному от каждого атома. Такая связь называется **ковалентной связью**.

Электроны, участвующие в ковалентной связи, называются **валентными электронами**. Значит, валентные электроны относятся ко всем атомам кристалла.

Электронная проводимость. Связь, образованная при низких температурах электронными парами, является крепкой и не разрывается. Поэтому при низких температурах кремний не пропускает электрический ток. При повышении температуры растет кинетическая энергия валентных электронов. Некоторые связи начинают разрываться, а электроны из них превращаются в свободные электроны, как в металлах. Эти электроны под действием электрического поля перемещаются по полупроводнику и создают электрический ток (рис. 9.5).

Появление тока в полупроводнике в результате перемещения свободных электронов называется электронной проводимостью или **проводимостью *n*-типа** (по-латински *negativus* – отрицательный).

Дырочная проводимость. Электрон, участвовавший в ковалентной связи, освобождает место и на этом месте образуется дырка. Когда из нейтрального атома уходит отрицательно заряженный электрон, его место считается как положительный заряд.

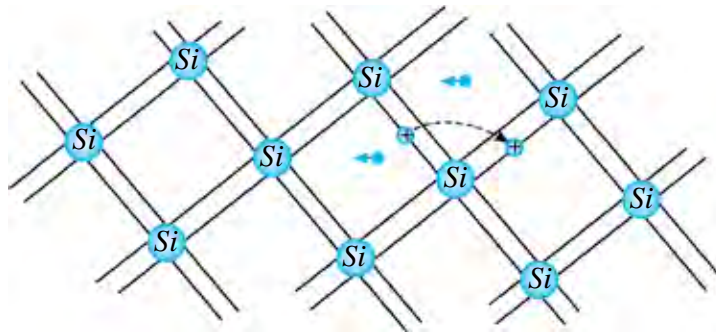


Рис. 9.5.

Пустое место занимает другой электрон, участвующий в ковалентной связи. Но теперь дырка появится в другом месте. Таким образом, при перемещении электронов с одного места на другое происходит относительное перемещение дырок.

Когда нет электрического поля, перемещение электронов и соответственно дырок будет беспорядочным.

Под действием электрического поля свободные электроны будут перемещаться в одну сторону, а дырки в другую сторону.

Точно также при скачке соседнего электрона в дырку, которая появилась в начале проводника, положительно заряженная дырка перемещается в конец проводника (рис. 9.6). Такая проводимость называется дырочной проводимостью полупроводника или **проводимостью p-типа** (по-латински *positives* – положительный).

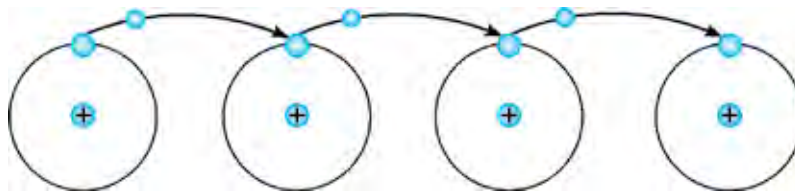


Рис. 9.6.

Таким образом, в чистых (без примесей) полупроводниках существует электронная проводимость, связанная с движением свободных электронов, и дырочная проводимость, связанная с движением дырок.

Проводимость чистого полупроводника без примесей называется **собственной проводимостью**. Здесь в данном веществе электронная и дырочная проводимость будут почти равны.

Способность чистых полупроводников пропускать электрический ток мала из-за небольшого количества в них свободных электронов и дырок.

Смешанные полупроводники: донорные смеси. Теперь в чистый полупроводниковый кремний добавим немного примеси. Сначала между атомами кремния внесем пятивалентный мышьяк (As).

Здесь места электронов, создающих четыре ковалентные связи кремния, занимают четыре электрона мышьяка. Пятый электрон мышьяка остается не связанным и превращается в свободный электрон (рис. 9.7а).

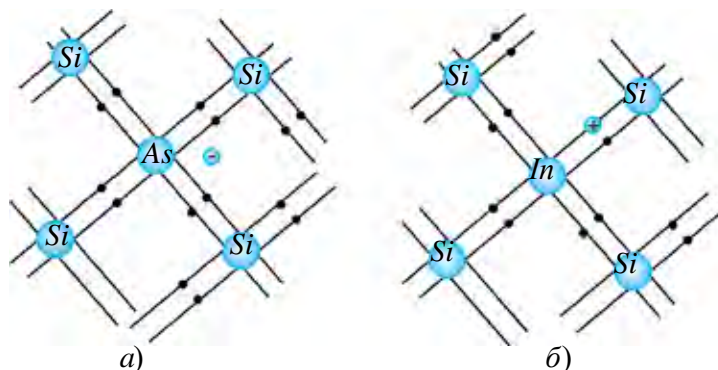


Рис. 9.7.

В результате количество электронов будет больше, чем количество дырок. Удельное сопротивление полупроводника резко уменьшится. Если количество атомов добавленного мышьяка составляет десятимиллионную часть атомов полупроводника, то концентрация свободных электронов (количество электронов, приходящееся на 1 см^3) будет в тысячи раз больше, чем в чистом полупроводнике. Примеси, которые при добавлении легко отдают свои электроны, называются **донорными примесями**. Из-за того, что в донорных примесях основными носителями тока являются электроны, их называют **полупроводниками n-типа**. Дырки в этих полупроводниках относятся к неосновным носителям заряда

Акцепторные примеси. В чистый полупроводниковый кремний добавим вещество индий (In). Индий является трехвалентным элементом, три его электрона создают ковалентную связь с атомом кремния. Здесь не хватает одного электрона для создания нормальной ковалентной связи индия с соседними атомами. В результате образуется дырка. Сколько атомов индия будет внесено в кристалл, столько же образуется дырок (рис. 9.7б).

Примеси такого вида называют **акцепторными примесями**. При вводе полупроводника в электрическое поле происходит перемещение дырок и появляется дырочная проводимость. Полупроводники с примесями, основными носителями тока в которых являются дырки, называются **полупроводниками p -типа**. В этих полупроводниках электроны являются неосновными носителями заряда.



1. Из-за каких свойств некоторые вещества называются полупроводниками?
2. С движением каких частиц связана электронная проводимость?
3. Что происходит при образовании пары «электрон-дырка»?
4. Почему сопротивление полупроводника очень сильно зависит от внесенных в него примесей?
5. Какие носители заряда считаются основными в акцепторных полупроводниках?



Возьмите таблицу периодической системы химических элементов Д.И. Менделеева. Выпишите элементы из группы III и V, которые можно использовать в качестве примеси. Нарисуйте схему получения примесного полупроводника с полупроводником IV группы.

Тема 44. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ (ДИОДЫ, ТРАНЗИСТОРЫ) И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИХ В ТЕХНИКЕ

Рассмотрим полупроводник, состоящий из кристаллов n -типа с одной стороны и кристаллов p -типа с другой (рис. 9.8). В средней части полупроводника свободные электроны быстро заполняют свободные дырки. В результате в середине полупроводника образуется область, в которой отсутствуют носители заряда. Свойства этой области будут похожи на свойства диэлектрика.

Эта область в дальнейшем будет препятствовать прохождению электронов в p -область, а дырок в n -область. По этой причине его называют **запирающим слоем**.

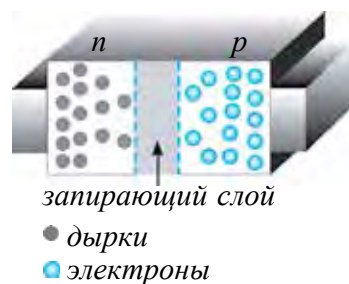


Рис. 9.8.

Данный полупроводник соединим с источником тока. Сначала p -область полупроводника соединим с отрицательным полюсом источника, n -область – с положительным полюсом источника (рис. 9.9).

В этом случае электроны притягиваются к положительному полюсу источника, а дырки – к отрицательному полюсу. В результате запирающий слой расширяется. Через полупроводник почти не проходит ток. Такое состояние называется **обратным p - n переходом**.

Теперь p -область полупроводника соединим с положительным полюсом источника, а n -область соединим с отрицательным полюсом источника. Здесь электроны отталкиваются от n -области и притягиваются к p -области.

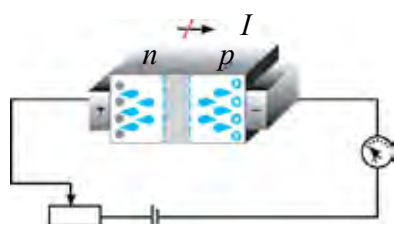


Рис. 9.9.

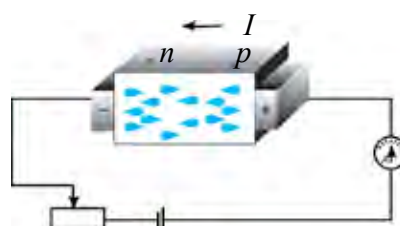


Рис. 9.10.

В свою очередь дырки отталкиваются от p -области и притягиваются к n -области. В результате сужается запирающий слой и через него проходят носители заряда (рис. 9.10). Через полупроводник проходит ток. Такое состояние называется **прямым p - n переходом**. При прямом p - n переходе сопротивление полупроводника будет в несколько раз меньше, чем при обратном p - n переходе. В полупроводнике из-за p - n перехода ток проходит только в одном направлении. Этим свойством пользуются в полупроводниковых приборах.

Полупроводниковый диод

Чтобы создать p - n переход в полупроводниках, не достаточно механического соединения двух полупроводников, которые обладают p - и n -проводимостью, потому что в этом случае расстояние между ними будет большим. Толщина p - и n -переходов должна быть равной межатомным расстояниям, поэтому в поверхность германиевого монокристалла вводят (вплавляют) индий. Благодаря явлению диффузии, атомы индия внедряются в монокристаллы германия. В результате на поверхности кристалла германия образуется область с проводимостью p -типа.

Область монокристалла германия, куда не вошли атомы индия, как и раньше обладает проводимостью n -типа. В промежуточной области образуется p - n переход (рис. 9.11а).

Полупроводниковый прибор, имеющий один $p-n$ переход, называется **полупроводниковым диодом**.

Для того чтобы уменьшить влияние света, воздуха и внешних электрических и магнитных полей на полупроводниковый диод, кристалл германия помещают в герметично закрытую металлическую оболочку.

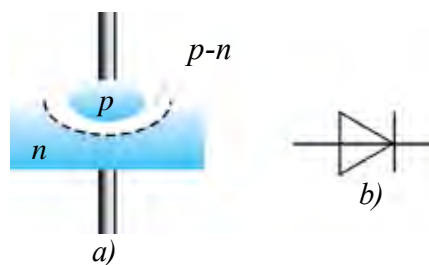


Рис. 9.11.

Условное обозначение полупроводникового диода приводится на рис. 9.11б.

Понятие о транзисторе.

Полупроводниковая система, имеющая два $p-n$ перехода, называется **транзистор**. С помощью транзистора создаются, управляются и усиливаются электрические колебания. Для изготовления транзистора германиевый кристалл помещают в корпус, снабженный выводами. С двух сторон в поверхность кристалла, обладающего электронной проводимостью, вводят индий. Толщина германиевого кристалла берется очень маленькой (несколько микрометров). Этот слой называется основой или **базой** транзистора (рис. 9.12а).

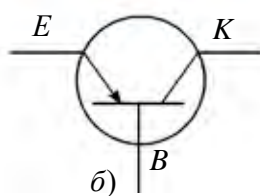
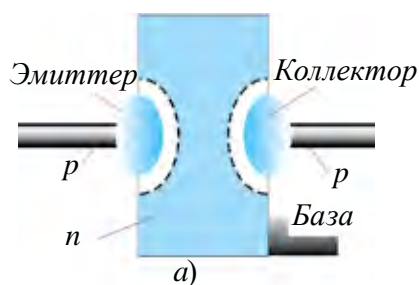


Рис. 9.12.

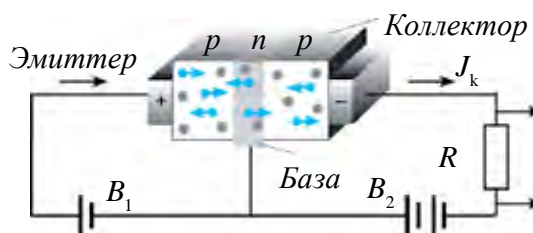


Рис. 9.13.

Крайние зоны с двух сторон кристалла, обладающие дырочной проводимостью, называются **эмиттер** и **коллектор**. Транзистор такого типа называется **$p-n-p$ транзистором** (рис. 9.12 а).

Транзистор изготавливают таким образом, чтобы концентрация дырок в области эмиттера в несколько раз превышала концентрацию электронов базы. Условное обозначения транзистора приводится на рис. 9.12б. Посмотрим, как работает транзистор (рис. 9.13).

Напряжение батарейки B_1 , подключенной между эмиттером и базой, создает прямой $p-n$ переход. Батарейка B_2 между коллектором и базой создает обратный $p-n$ переход. Каким образом появляется ток в коллекторе? Под действием напряжения, приложенного между базой и эмиттером, дырки входят в базу. Так как база транзистора очень тонкая и концентрация электронов невелика, только малое количество дырок соединяется с электронами. Большинство дырок переходят в область коллектора.

К коллектору подключен отрицательный полюс батарейки B_2 и дырки, подтягиваясь к нему, создают коллекторный ток. Сила тока в цепи эмиттер-база будет намного меньше, чем сила тока по направлению эмиттер-коллектор. По этой причине транзисторами пользуются для усиления сигналов переменного тока.

При изготовлении транзистора в качестве базы можно использовать полупроводник p -типа. В этом случае области эмиттера и коллектора изготавливаются из полупроводника n -типа. Такой транзистор называется **$n-p-n$ транзистором**.

Принцип работы транзисторов такого типа не отличается от транзистора типа $p-n-p$. В этих транзисторах ток направлен от коллектора в сторону эмиттера.

Интегральные микросхемы.*

В 70-х годах прошлого века изобрели микросхемы, состоящие из тысяч микроскопических транзисторов, которые размещались на пластинке полупроводникового материала размером с монетку. Из-за того, что вместе с транзисторами размещались диоды, конденсаторы, резисторы и другие радиоэлектронные элементы, такие схемы называли интегральными микросхемами. Это изобретение дало возможность размещения сложных схем в маленьком объеме и создания настольных компьютеров. Если первоначально радиоэлементы размещали на поверхности полупроводника, в дальнейшем их начали распределять по всему объему. Подобные устройства называются микрочипами. На основе микрочипов были созданы мобильные телефоны, планшетные компьютеры (Notebook) и другие маленькие радиоэлектронные приборы. На сегодняшний день на микрочипе размером с монету размещают миллионы транзисторов и радиоэлементов. Это означает, что размер радиоэлемента составляет примерно $\approx 10^{-9}$ м и равен одному нанометру. При проектировании и изготовлении таких микросхем используется **нанотехнология** – комплекс методов, позволяющих создавать объекты наноразмеров.

Освоение этой отрасли и ее развитие начинается с изготовления самых простых электротехнических приборов и изучения принципов их работы.

Выпрямитель переменного тока. Известно, что телевизоры, радиоприемники и другие подобные приборы работают при подключении в сеть переменного тока напряжением 220 В. Но их составляющие – полупроводниковые приборы, такие как диод, транзистор должны работать от источника постоянного тока. Значит, в данных приборах должно быть специальное устройство, преобразующее переменный ток в постоянный. На рисунке 9.14 приводится простая схема такого прибора.

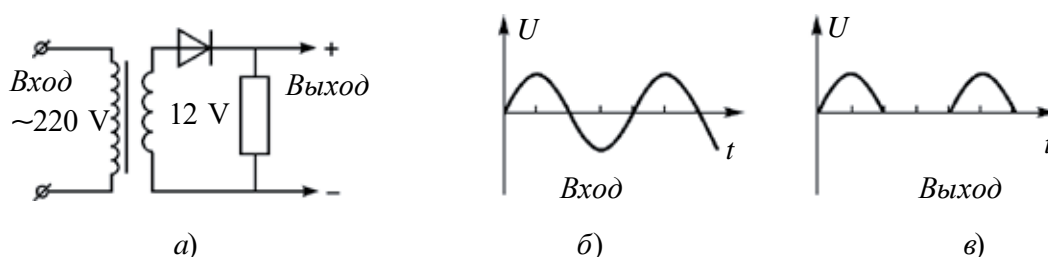


Рис. 9.14.

В этой схеме на первичную катушку трансформатора подается переменный ток напряжением 220 В, на выходе вторичной катушки получают 12 В. Полупроводниковый диод в положительной половине периода напряжения пропускает ток, в отрицательном периоде не пропускает. Согласно этому такой прибор называется однофазный однополупериодный выпрямитель.

Форма напряжения на входе и выходе выпрямителя приводится на рис. 9.14 (б и в). Как видно из рисунка, на схеме используется только половинное напряжение. Кроме этого, также сильно меняется его величина. Поэтому чаще используются двухполупериодные выпрямители.



1. Почему полупроводниковый диод пропускает ток в одну сторону?
2. Что такое р-п переход?
3. Как зависит сопротивление полупроводника от р-п перехода?
4. В каких областях транзистора происходят прямые и обратные р-п переходы?
5. Чем отличаются транзисторы р-п-р и п-р-п типов?

Тема 45. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА: ИЗУЧЕНИЕ ВОЛЬТ-АМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ДИОДА

Цель работы. Изучение зависимости силы тока, проходящего через полупроводниковый диод, от приложенного напряжения.

Необходимые принадлежности: 1) полупроводниковый диод (в колодке); 2) источник постоянного тока (36-42 В); 3) переключатель; 4) проводник; 5) миллиамперметр; 6) реостат; 7) вольтметр.

Выполнение работы:

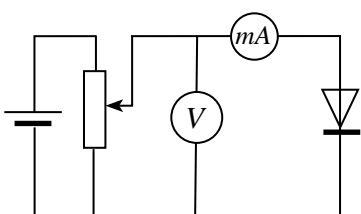


Рис. 9.15.

1. Приготовить все необходимые принадлежности и собрать электрическую схему по рис. 9.15;
2. Продвинуть ходунки реостата так, чтобы было напряжение на выходе равнялось 0 В.
3. Подключить переключатель.
4. Передвигая ходунки реостата, увели-

чивать напряжение, подаваемое на внешнюю цепь.

5. Результаты измерения записываются в таблицу.

<i>U</i>, В							
<i>I</i>, А							

6. Поменять полюса источника тока, соединить и повторить эксперимент.

7. По полученным результатам составляется график зависимости силы тока, проходящего через полупроводниковый диод, от приложенного напряжения.

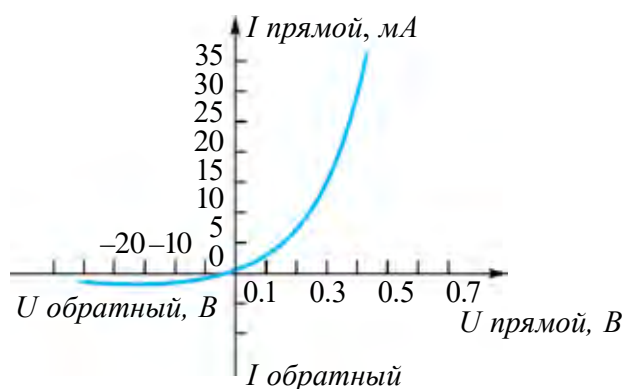


Рис. 9.16

8. Зависимость силы тока, проходящего через полупроводниковый диод в направлении прямого *p-n* перехода и обратного *p-n* перехода, от приложенного напряжения приводится на графике (рис. 9.16).

При подаче напряжения на диод в обратном направлении нельзя подавать напряжение больше, чем указано в паспорте диода.



1. При правильном соединении диода обратите внимание на нелинейность зависимости силы тока от приложенного напряжения и постарайтесь объяснить причину этого.
2. Почему при приложении напряжения в обратном направлении через диод проходит ток?
3. Используя полученные результаты, определите электрическое сопротивление для прямого и обратного переходов диода.

Упражнение 9

1. Как меняется температура медного стержня при прохождении через него тока с плотностью 9 А/мм^2 в течение $0,5 \text{ сек}$? Удельное сопротивление меди $1,7 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$, плотность 8900 кг/м^3 , удельная теплоемкость 380 Дж/(кг К) (Ответ: $0,20 \text{ }^\circ\text{C}$).

2. Во сколько раз изменяется удельное сопротивление спирали, изготовленной из ниобия, при нагревании до $100 \text{ }^\circ\text{C}$? Для ниобия $\alpha = 0,003 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ (Ответ: примерно в 1,3 раза).

3. Сопротивление провода из никелина при $20 \text{ }^\circ\text{C}$ равно 20 Ом . Рассчитайте его сопротивление при нагреве провода до $120 \text{ }^\circ\text{C}$? Для никелина $\alpha = 0,0001 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.

4. В вакуумном диоде электрон доходит до анода со скоростью 8 Мм/с . Найдите напряжение анода. (Ответ: 180 В).

5. В вакуумном диоде максимальная сила тока анода равна 50 мА . Сколько электронов вылетают в каждую секунду? (Ответ: $3,1 \cdot 10^{17}$).

6. Имеется ли разница между положительным ионом и дыркой в полупроводниках?

7. Почему при постоянных внешних условиях, несмотря на непрерывное появление электронно-дырочных пар, в полупроводниках не меняется количество носителей заряда?

8. Каким типом проводимости будет обладать кристалл германия, если внести в него фосфор, цинк или калий?

9. Почему при одинаковых напряжениях ток при прямом $p-n$ переходе бывает намного больше, чем ток обратного перехода ?

10. К термистору (полупроводниковый прибор, в котором сопротивление меняется в зависимости от температуры) последовательно подключено сопротивление 1 кОм и подано напряжение 20 В. При комнатной температуре сила тока в цепи равна 5 мА. Когда термистор опустили в горячую воду, сила тока, проходящего через него, возросла до 10 мА. Во сколько раз уменьшилось сопротивление термистора? (Ответ: 3 раза).


Тестовые вопросы по итогам главы IX

- 1. Дополните предложение. Явление вылета электрона в результате нагревания металла называется**
А) ... термоэлектронной эмиссией. В) ... электронной эмиссией.
С) ... работой выхода. Д) ... током насыщения.
- 2. В чем заключается природа электрического тока в вакууме?**
А) движение в одном направлении электронного потока;
В) движение положительных ионов в одном направлении;
С) движение в одном направлении отрицательных ионов;
Д) движение в одном направлении электронов, положительных и отрицательных ионов.
- 3. Каким типом проводимости обладают полупроводники с донорными примесями?**
А) в основном электронной проводимостью;
В) в основном дырочной проводимостью;
С) в равных количествах электронной и дырочной проводимостью;
Д) не пропускают электрический ток.
- 4. В чистом полупроводнике в результате упорядоченного движения электронов проходит ток 1 мА. Чему равна полная сила тока, проходящего через полупроводник?**
А) 1 мА; В) 2 мА; С) 0,5 мА; Д) 0.
- 5. Продолжите предложение. «С увеличением температуры, сопротивление полупроводника**»
А) ... растёт. В) ... сначала растёт, затем уменьшается.
С) ... уменьшается. Д) ... сначала уменьшается, затем растёт.

6. Что происходит в полупроводнике при образовании пары «электрон-дырка»?
- A) образуется положительный ион;
 - B) образуется нейтральный атом;
 - C) образуется отрицательный ион;
 - D) образуются положительный и отрицательный ионы.
7. С движением каких частиц связана примесная проводимость?
- A) в основном свободных электронов;
 - B) в основном дырок;
 - C) в равных количествах свободных электронов и дырок;
 - D) в разных количествах свободных электронов или дырок.
8. Закончите предложение. При прямом р-п переходе запирающий слой в полупроводнике
- A) ... расширяется.
 - B) ... сжимается.
 - C) ... остается без изменения.
 - D) ... в зависимости от величины напряжения линейно изменяется.
9. Сколько электронов участвуют в ковалентной связи?
- A) 1 шт; B) 2 шт; C) 3 шт; D) 4 шт.
10. Какой полюс батарейки надо подключить к базе транзистора, чтобы при *n-p-n* переходе через эмиттер пошел ток?
- A) положительный; C) нулевой;
 - B) отрицательный; D) не имеет значения.

Основные понятия, правила и законы, изученные в главе IX

Термоэлектронная эмиссия	Явление выбивания электронов из металла в результате его нагревания.
Электрический ток в вакууме	Заключается в движении в одном направлении потока электронов и ионов.
Двухэлектродная электронная лампа	Вакуумная лампа – диод, состоящая из анода и катода.
Ток насыщения	Все электроны, покидающие катод, достигают анода, а анодный ток остается без изменения.
Формула Богуславского-Ленгмюра	$I_a = kU^{3/2}$. Зависимость силы тока, проходящего через вакуумный диод, от анодного напряжения.
Зависимость сопротивления металлических проводников от температуры	$R = R_0(1 + \alpha t)$; R_0 – сопротивление проводника при 0°C , R – сопротивление при температуре t , α – температурный коэффициент сопротивления.
Сверхпроводимость	Резкое уменьшение сопротивления проводника до нуля при понижении температуры.
Электронная проводимость. (проводимость n -типа)	Появление тока в полупроводнике в результате перемещения свободных электронов.
Дырочная проводимость (проводимость p -типа).	Свободное место, образованное в результате нехватки электрона в ковалентной связи, называется дыркой. Под воздействием электрического поля дырки перемещаются в полупроводнике, и возникает дырочная проводимость.
Собственная проводимость в полупроводниках	Пропускание электрического тока в результате перемещения в полупроводнике свободных электронов и дырок в равных количествах.
Донорные примеси	Примеси, при добавлении которых чистые полупроводники легко отдают электроны. При этом образуется проводимость n -типа.

Акцепторные примеси	Примеси, при добавлении которых в чистых полупроводниках не хватает одного электрона для ковалентной связи и образуются дырки. При этом возникает проводимость p -типа.
Запирающий слой	Область, образуемая на границе полупроводника с одной стороны n -типа, с другой стороны p -типа, где не будет заряженных частиц.
Прямой p - n – переход	Прохождение тока через полупроводник, состоящий из кристаллов n -типа с одной стороны и p -типа с другой стороны, когда на анод (p -область) подается положительный потенциал, а на катод n -область – отрицательный, в результате чего происходит сужение запирающего слоя и через него проходят носители заряда.
Обратный p - n – переход	Непрохождение тока через полупроводник в результате увеличения запирающего слоя при подключении к p -области) отрицательного потенциала, а к катоду n -области положительного потенциала.
Полупроводниковый диод	Полупроводниковый прибор, имеющий один p - n переход. Условный знак  .
Транзистор	Полупроводниковый прибор, имеющий два p - n -перехода. Различают структуры p - n - p и n - p - n .
Интегральная микросхема (ИМС)	Микроэлектронное устройство, состоящее из многочисленных элементов, очень компактно расположенных на полупроводниковой подложке.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Физика: Механика. 10 кл.: Учеб. для углубленного изучения физики/ *М.М. Балашов* и др.; под ред. *Г.Я. Мякишева*. – 5-е изд. стереотип. – М.: «Дрофа», 2002. – 496 с.: ил.
2. Физика: Электродинамика. 10–11 кл.: Учеб. для углубленного изучения физики/ *Г.Я. Мякишев, А.З. Синяков, Б. А. Слободскова*. – 4-е изд. стереотип. – М.: «Дрофа», 2002. – 480 с.: ил.
3. Физика. 10 кл.: Учеб. для общеобразоват. учеб. заведений. – 4-е изд. стереотип. – М.: «Дрофа», 2001. – 416 с.: ил.
4. *Н.Ш. Турдиев*. Физика. Учебник для 7 класса общеобразовательных школ с углубленным изучением физики. – Т.: Изд. дом им. Гафура Гуляма, 2016. (узб).
5. *Н.Ш. Турдиев*. Физика. Учебник для 8 класса общеобразовательных школ. – Т.: «Турон-Икбол», 2006. (рус).
6. Национальная энциклопедия Узбекистана. – Т.: Гос. Научн. Изд.-во «Национальная энциклопедия Узбекистана», 2004.
7. Физика. Энциклопедия/ под. ред. *Ю.В. Прохорова*. – М.: Большая Российская энциклопедия, 2003. – 944 с.
8. *А. Нуманхужаев* и др. Физика I. – Т.: «Укитувчи». – 2002. – 400 с.
9. *А. Нуманхужаев* и др. Физика II. – Т.: «Укитувчи». – 2003. – 414 с.
10. *А. Нуманхужаев* и др. Физика III. – Т.: «Укитувчи». – 2001. – 352 с.
11. *К.А. Турсунметов, А.М. Худайбергенов*. Практикум по физике. (узб). – Т.: Укитувчи. 2003.
12. *К.А. Турсунметов* и др. Сборник задач по физике. (узб)–Т.: «Укитувчи». 2004.
13. *К.А. Турсунметов* и др. Физика. Справочник. (узб) –Т.: «Узбекистан». 2016. – 202 с.
14. *К. Суяров, Ш. Усманов, Ж. Усаров*. Физика (Механика). 1-книга. Вспомогательное пособие учителю (узб): Т.: Изд-во «Янги нашр», – 2010.
15. *А.Г. Ганиев, А.К. Авлиякулов, Г.А. Алимарданова*. Физика. 1 часть. Учебник для академических лицеев и профессиональных колледжей. (узб), – Т.: «Укитувчи». 2012. – 400 с.
16. *А.Г. Ганиев, А.К. Авлиякулов, Г.А. Алимарданова*. Физика. 2 часть. Учебник для академических лицеев и профессиональных колледжей. (узб) – Т.: «Укитувчи». 2013. – 208 с.
17. *К. Суяров, А. Хусанов, Л. Худайбердиев*. Физика. Механика и молекулярная физика. (узб), 1 книга. – Т.: «Укитувчи». – 2002.
18. *Л. Худайбердиев, А. Хусанов, А. Юнусов, Ж. Усаров*. Физика. Электродинамика. Электромагнитные колебания. 2 книга. (узб), – Т.: «Укитувчи». – 2004.

ОГЛАВЛЕНИЕ

МЕХАНИКА	3
Тема 1. Исследовательские методы физики	3
Глава I. КИНЕМАТИКА	5
Тема 2. Виды механического движения. Принцип независимости движения.....	5
Тема 3. Вертикальное движение тел	7
Тема 4. Неравномерное движение по окружности. Угловое ускорение. Тангенциальное ускорение.....	10
Тема 5. Взаимная передача вращательного и поступательного движения	14
Тема 6. Движение горизонтально брошенного тела.....	16
Тема 7. Движение тела, брошенного под углом к горизонту.....	18
Тема 8. Лабораторная работа: Изучение движения тела, брошенного под углом к горизонту.	22
Тестовые вопросы по итогам главы I.....	24
Основные понятия, правила и законы, изученные в главе I.....	25
Глава II. ДИНАМИКА	28
Тема 9. Законы динамики.....	28
Тема 10. Принцип относительности Галилея. Инерциальные и неинерциальные системы отсчета	32
Тема 11. Движение в гравитационном поле	35
Тема 12. Зависимость веса тела от вида движения.....	37
Тема 13. Движение тела под воздействием нескольких сил.....	40
Тестовые вопросы по итогам главы II	44
Основные понятия, правила и законы, изученные в главе II.....	45
Глава III. ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ В МЕХАНИКЕ	47
Тема 14. Энергия и работа. Закон сохранения энергии. Работа, выполняемая при движении тел по наклонной плоскости.....	47
Тема 15. Лабораторная работа: Определение коэффициента полезного действия наклонной плоскости	51
Тема-16. Абсолютно упругие и неупругие столкновения тел.....	53
Тестовые вопросы по итогам главы III.....	56
Основные понятия, правила и законы, изученные в главе III	58
Глава IV. СТАТИКА И ГИДРОДИНАМИКА	59
Тема 17. Условия равновесия тел	59
Тема 18. Механизмы, работающие на основе правила моментов.....	62
Тема 19. Динамика вращательного движения.....	65
Тема 20. Движение жидкостей и газов. Теорема непрерывности течения. Уравнение Бернулли	68
Тема 21. Использование в технике зависимости давления от скорости двигающихся газов и жидкостей	71
Тестовые вопросы по итогам главы IV.....	75
Основные понятия, правила и законы, изученные в главе IV	76
Глава V. МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ	78
Тема 22. Гармонические колебания.....	78

Тема 23. Пружинные и математические маятники.....	81
Тема 24. Лабораторная работа: Определение ускорения свободного падения с помощью математического маятника.....	85
Тема 25. Вынужденные колебания. Резонанс в технике	86
Тема 26. Распределение механических волн в средах. Использование ультра- и инфразвуков в быту и технике	90
Тестовые вопросы по итогам главы V	95
Основные понятия, правила и законы, изученные в главе V.....	96
Глава VI. ОСНОВЫ ТЕРМОДИНАМИКИ.....	98
Тема 27. Необратимость тепловых процессов. Законы термодинамики.....	98
Тема 28. Адиабатический процесс. Коэффициент полезного действия тепловых машин. Цикл Карно.....	102
Тема 29. Значение тепловых двигателей в жизни человека. Тепловые двигатели и экология	106
Основные понятия, правила и законы, изученные в главе VI	112
Тестовые вопросы по итогам главы V	112
Глава VII. ЭЛЕКТРОДИНАМИКА	114
Тема 30. Закон сохранения заряда. Поле точечного заряда. Принцип суперпозиции напряженности электрического поля	114
Тема 31. Электрическое поле заряженного шара. Диэлектрическая восприимчивость	118
Тема 32. Потенциал поля точечного заряда. Разность потенциалов	120
Тема 33. Работа, выполняемая при перемещении заряда в электростатическом поле.....	123
Тема 34. Энергия электрического поля	125
Тестовые вопросы по итогам главы VII	129
Основные понятия, правила и законы, изученные в главе VII.....	130
Глава VIII. ЗАКОНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА	132
Тема 35. Электропроводимость. Зависимость силы тока от напряжения	132
Тема 36. Сила тока и плотность тока. Действие электрического тока	136
Тема 37. Закон Ома для полной цепи. Коэффициент полезного действия силы тока.	138
Тема 38. Последовательное и параллельное соединение источников тока.....	141
Тема 39. Повышение пределов измерения амперметра и вольтметра.....	145
Тема 40. Лабораторная работа: Определение ЭДС и внутреннего сопротивления источника тока.....	147
Тестовые вопросы по итогам главы VIII	149
Основные понятия, правила и законы, изученные в главе VIII.....	150
Глава IX. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В РАЗЛИЧНЫХ СРЕДАХ	152
Тема 41. Электрический ток в вакууме	152
Тема 42. Зависимость сопротивления металлических проводников от температуры... ..	154
Тема 43. Собственная проводимость полупроводников. Примесные проводимости....	157
Тема 44. Полупроводниковые приборы (диоды, транзисторы) и использование их в технике	161
Тема 45. Лабораторная работа: Изучение вольт-амперной характеристики полупроводникового диода.....	166
Тестовые вопросы по итогам главы IX	168
Основные понятия, правила и законы, изученные в главе IX.....	170
ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА	172

F58 Физика. Учебник для учеников 10 класса средних образовательных учреждений и учреждений среднего специального, профессионального образования. /Н.Ш. Турдиев, К.А. Турсунметов, А.Г. Ганиев, К.Т. Суяров, Ж.Э. Усаров, А.К. Авлиякулов. – Т.: Изд-во «Нисо Полиграф», 2017. – 176 с.

ISBN 978-9943-4867-7-5

УО•К: 53(075.3)
КБК22.3ya721

O'quv nashri

**Narziqul Sheronovich Turdiyev, Komiljon Axmetovich Tursunmetov,
Abduqahhor Gadoyevich Ganiyev, Kusharbay Tashbayevich Suyarov,
Jabbor Eshbekovich Usarov, Abdurashit Karimovich Avliyoqulov**

F I Z I K A

*O'rtta ta'lim muassasalarining 10-sinfi va o'rtta maxsus,
kasb-hunar ta'limi muassasalarining o'quvchilari uchun darslik*

(Rus tilida)

1-nashri

Переводчик *Б. Курбанов*

Редактор *Т. Алиева*

Художественный редактор *Ж. Гурова*

Технический редактор *Д. Салихова*

Компьютерная верстка *Т. Абкеримов*

Оригинал-макет изготовлен издательством «NISO POLIGRAF».
Ташкентский вилоят, Урта Чирчикский туман, ССГ, «Ок-Ота»,
махалля Машъал, улица Марказий, дом 1.

Номер лицензии АИ № 265.24.04.2015.

Подписано в печать 11 октября 2017 года. Формат 70×100^{1/16}.

Гарнитура «Times New Roman». Кегель 12. Офсетная печать.

Условных печатных листов 12,87. Учетно-издательских листов 12,76.

Договор № 186. Тираж 49607. Заказ №17-626.

Отпечатано в типографии издательско-полиграфического творческого дома «O'zbekiston»
Агентства по печати и информации Республики Узбекистан. 100011, г. Ташкент, ул. Навои, 30

Таблица состояния арендуемого учебника

№	Имя ученика	Учебный год	Состояние учебника при получении	Подпись классного руководителя	Состояние учебника при сдаче	Подпись классного руководителя
1						
2						
3						
4						
5						
6						

При сдаче учебника классный руководитель оценивает его состояние по показателям, заполняя таблицу:

Новый	Состояние учебника, полученного в первый раз
Хорошее	Обложка в хорошем состоянии, переплет целый. Все страницы в наличии, не порваны и не исписаны.
Удовлетворительное	Обложка немного повреждена, переплет книги нарушен, уголки страниц загнуты, некоторые страницы исписаны. Оторванные страницы заново приклеены.
Плохое	Обложка исписана и порвана, переплет отсутствует. Многие страницы порваны, некоторые отсутствуют. Учебник не подлежит восстановлению.