В ПОМОЩЬ
ПОСТУПАЮЩИМ
В ВУЗ

В. Н. ПОДЫМОВ

ПОСОБИЕ ПО ЭЛЕМЕНТАРНОЙ ФИЗИКЕ

1967

В ПОМОЩЬ ПОСТУПАЮЩИМ В ВУЗ

В. Н. ПОДЫМОВ

ПОСОБИЕ ПО ЭЛЕМЕНТАРНОЙ ФИЗИКЕ

Для заочных подготовительных курсов

ИЗДАТЕЛЬСТВО
КАЗАНСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
1967

Печатается по постановлению
Редакционно-издательского совета
Казанского университета

Научный редактор кандидат физико-математических наук
А. И. Марков

Пособие составлено в соответствии с программой по физике для поступающих в вузы. Цель книги — помочь подготовиться к приемным экзаменам по элементарной физике. Главное внимание уделяется тем положениям и законам физики, в понимании которых наблюдается наибольшее количество ошибок. По самым трудным разделам даны подробные объяснения Приведено много задач с подробными решениями и задач для самостоятельного решения (с ответами). Отдельные серии задач специально подобраны для всестороннего раскрытия методики применения законов, недостаточно хорошо осваиваемых школьниками

Пособие рассчитано на лиц, самостоятельно готовящихся к приемным экзаменам в вузы.

$\frac{2\text{-}3}{8\text{-}67}$

ПРЕДИСЛОВИЕ

Предлагаемое краткое пособие рассчитано на лиц, окончивших среднюю школу и самостоятельно готовящихся к конкурсным экзаменам в вуз. Оно составлено в соответствии с „Программой приемных экзаменов для поступающих в высшие учебные заведения СССР в 1966 г.“ В пособии использован опыт работы автора в средней школе и на заочных подготовительных курсах при Казанском государственном университете. Материал для пособия взят из самой разнообразной физической литературы, но в большей степени переработан. Некоторые части написаны самим автором. Большинство задач заимствовано из следующих источников: „Сборник вопросов и задач по физике“ под редакцией П. А. Знаменского; „Задачи по физике“ — Л. Н. Эрастова, С. Н. Соколова; „Задачи по физике“ — В. Г. Зубова, В. П. Шальнова; „Краткое пособие по элементарной физике“ — В. П. Шальнова; „Сборник задач и вопросов по физике“ под редакцией Н. И. Гольдфарба и др. Много задач взято из журнала „Наука и жизнь“.

Материал излагается в следующем порядке.

Каждой теме предпосланы вопросы соответствующего раздела программы; содержатся пояснения и замечания, вопросы для самопроверки, номера типичных задач и решение их. По многим разделам предлагается дополнительный материал, как правило содержащий сведения сверх программы, а также разбор интересных с той или иной точки зрения задач, предлагавшихся на конкурсах или олимпиадах.

Автор искренне благодарен доценту Е. Л. Раффу, сделавшему много ценных замечаний в ходе предварительного обсуждения пособия. Автор будет признателен за все замечания, советы и пожелания, которые просит посылать по адресу: г. Казань, ул. Ленина, Казанский государственный университет, физический факультет.

ВВЕДЕНИЕ

Чтобы добиться хороших знаний по физике, нужно не только изучить содержание основных учебников, но и ознакомиться с доступной пониманию дополнительной физической литературой.

В качестве основных учебных пособий рекомендуются:

1. А. В. Перышкин и др. „Физика“, учебник для 6 кл
2. А. В. Перышкин и др. „Физика“, учебник для 7 кл.
3. А. В. Перышкин и В. В. Крауклис. „Курс физики“, часть 1.
4. А. В. Перышкин. „Курс физики“, часть 2.
5. А. В. Перышкин. „Курс физики“, часть 3.
6. „Сборник вопросов и задач по физике“ под редакцией П. А. Знаменского.
7. В. Г. Зубов и В. П. Шальнов. „Задачи по физике“.

В качестве дополнительной литературы рекомендуется:

1. „Элементарный учебник физики“, т. 1, 2, 3 под редакцией акад. Г. С. Ландсберга.
2. М. Х. Терегулов. „Сборник вопросов и задач по физике“.

Прорабатывая теоретический материал по учебникам, с самого начала следует добиваться возможно более полного понимания физической сущности изучаемых явлений, развивать умение истолковывать физический смысл величин, входящих в формулы, приучать себя четко формулировать физические законы и понятия.

Повторяя теоретический материал, следует обратить особое внимание на решение задач и выполнение упражнений.

Для успешного усвоения материала можно рекомендовать следующие приемы.

1. Внимательно прочитать по учебнику теоретический материал темы (может быть, несколько раз!) и постараться в нем разобраться. После этого, закрыв книгу, попытаться мысленно изложить тему, написать по памяти определения или правила и сравнить с формулировками учебника. Если тема остается неясной, следует использовать другие учебники.

2. Вывести самостоятельно каждую формулу. Представить себе физическую картину процесса, описываемого формулой, построив соответствующие графики.

3. Не заглядывая в книгу, дать ответы на вопросы, приведенные в пособии в конце каждой темы, а затем проверить себя.

4. Теоретические положения темы обязательно закрепить решением задач, начиная с задач, содержащихся в учебнике.

При решении задачи необходимо прежде всего установить, какие физические законы отвечают ее содержанию. Этому поможет схема, рисунок, чертеж. Затем нужно выписать все необходимые формулы и, учитывая требования задачи, найти решение в общем виде.

Полученное выражение — конечную формулу — следует проверить по размерности. Размерность левой и правой частей формулы должна совпадать; если совпадения нет, нужно проследить за соответствием размерностей промежуточных выражений. Равенство размерностей конечной формулы является необходимым, но недостаточным условием правильности решения, так как во многие формулы входят безразмерные числа — коэффициенты, однако рекомендуемый прием является весьма полезным.

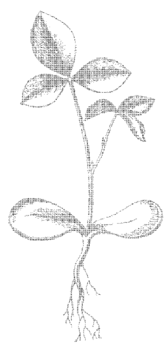
Числовые значения надо подставлять только в конечную формулу, предварительно выразив их в одной системе единиц. Числовой ответ обязательно должен содержать наименование.

В физике наибольшее употребление имеют две системы единиц: СИ и СГС. Твердое знание этих систем единиц является обязательным для поступающих в вуз. Международная система единиц СИ введена в Советском Союзе с 1 января 1963 года, причем в Государственном стандарте имеется указание на предпочтительное применение системы СИ во всех областях науки и техники, в народном хозяйстве и обучении. С системой единиц СИ можно познакомиться по книгам: 1. Беклемишев А. В. Меры и единицы физических величин, изд. 2. Физматгиз, М., 1963; 2. Бурдун Г. Д. Единицы физических величин, изд. 3. Гос. изд-во стандартов, М., 1963.

Международный союз чистой и прикладной физики наряду с системой СИ рекомендует применять в физических исследованиях систему СГС, размеры единиц которой более удобны для физических измерений и расчетов. Следует придерживаться обеих рекомендаций и все окончательные результаты вычислений давать в единицах системы СИ или СГС. Безусловно, следует уверенно переводить выражения из одной системы в другую.

В каждом случае нужно обращать внимание на степень точности числового ответа. Точность ответа не может быть больше точности исходных величин. Следовательно, получая для вычислений какие-либо данные, нужно выяснить, точные они или приближенные, и затем учесть это в ходе решения.

Разделы, снабженные заголовком „Дополнительный материал“, заучивать не надо. Они приводятся для того, чтобы указать учащемуся на некоторые пути расширения своего физического кругозора. На вступительных экзаменах знание этих сведений не требуется.



I МЕХАНИКА

1. СТАТИКА

Требования программы

Сложение сил, направленных по одной прямой. Сложение сил, действующих под углом друг к другу (графически). Разложение силы на две, действующие под углом друг к другу. Условия равновесия тела на наклонной плоскости. Момент силы. Условия равновесия тела, имеющего ось вращения (правило моментов). Центр тяжести тела.

Главная задача статики заключается в определении условий, при которых тело или несколько тел пребывают в покое. Поскольку практически все тела находятся под воздействием каких-то сил, изучение условий покоя тел сводится к изучению условий равновесия приложенных к телу сил.

Основными являются два закона равновесия: закон равенства сил и закон равенства моментов сил.

Математически закон равенства сил записывается в виде

$$F_1 + F_2 + \cdots + F_n = 0, \tag{1 1}$$

а закон равенства моментов сил — в виде

$$F_1 r_1 + F_2 r_2 + \cdots + F_n r_n = 0, \tag{1.2}$$

где r_1, r_2, ... — плечи соответствующих сил

В первом случае тело будет находиться в покое, если все действующие на него силы взаимно уравновешиваются. Во втором случае должны уравновешиваться все моменты сил.

Естественно поставить вопрос: когда пользоваться законом равенства сил и когда законом равенства моментов сил? Для ответа на этот вопрос рассмотрим примеры действия сил на какое-нибудь тело, например, на треугольник.

Предположим, что мы вырезали из картона равносторонний треугольник, положили на гладкую поверхность и подействовали на него тремя одинаковыми силами так, как это показано на рис. 1*а*. Направление действия всех трех сил проходит через точку *О*, которая является центром тяжести треугольника. Перемещая точку приложения каждой силы вдоль направления действия, получим фигуру, изображенную на рис. 1*б*. Применение правила параллелограмма убеждает нас, что все три силы в сумме дают нуль, а это, согласно формуле (1.1), означает неподвижность тела. Значит, в данном случае условием покоя тела будет равенство нулю векторной суммы действующих на него сил. Вернемся опять к схеме рис. 1*а*. Попробуем мысленно убрать одну из сил. Сразу видно, что результирующая двух других, будучи приложена к центру тяжести тела, сообщит ему поступательное движение.

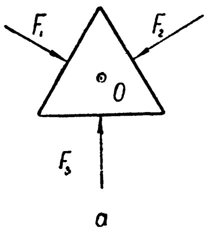


Рис. 1а.

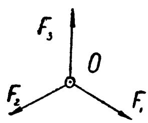


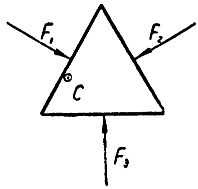
Рис. 1б.

Теперь прикрепим наш треугольник к поверхности, проткнув его булавкой, например в точке *С* (рис. 2*а*). Тем самым мы лишим его возможности двигаться поступательно, хотя не исключаем вращательного движения вокруг точки *С*. Пусть на треугольник действуют те же силы и в прежних направлениях. Поскольку ни одно из направлений не проходит через точку *С* (силы действуют „мимо“ точки *С*), возникают соответствующие моменты сил Определив плечи r_1, r_2 и r_3, получим фигуру, изображенную на рис. 2*б*. Считая моменты сил, стремящиеся повернуть тело по ходу часовой стрелки, положительными, выразим условие покоя треугольника равенством

$$F_1 r_1 + F_2 r_2 - F_3 r_3 = 0.$$

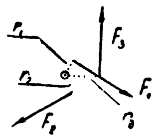
Если на схеме рис. 2*а* мысленно убрать одну из сил, то моменты двух других сил не уравновесятся и треугольник начнет вращаться вокруг точки C.

Таким образом, во всех случаях статического равновесия, изымая одну из сил и выявляя характер возникающего движения, мы получим указание, какой закон описывает состояние покоя тела. Если тело начинает поступательное движение — его условием покоя будет равенство сил (формула (1.1). Если же тело начинает вращаться — его условием покоя будет равенство моментов сил относительно оси вращения (формула (1.2). Если возникает сложное движение — поступательное с наложением вращательного, то условием покоя будет одновременное выполнение равенств (1.1) и (1.2).



а

Рис. 2а.



б

Рис. 2б.

Сложение сил, направленных по одной прямой, является частным случаем геометрического сложения, т. е. сумма (1.1) превращается в чисто алгебраическую сумму. Однако векторный характер сил требует учитывать не только величину, но и направление сил. Поэтому прежде чем записать формулу (1.1) для какой-нибудь конкретной задачи, выбирают положительное направление. Силы, действующие в положительном направлении, пишут в формуле (1.1) со знаком плюс, а силы, действующие в обратном направлении, — со знаком минус.

Точно так же учитывается векторный характер моментов сил, причем, как уже отмечалось выше, положительными моментами сил обычно считают те, которые стремятся повернуть тело по ходу часовой стрелки.

Чтобы уверенно применять закон равновесия (1.1) и (1.2), следует усвоить операции нахождения равнодействующей силы, разложения силы на две, определения центра тяжести, нахождения плеч различных сил.

Задачу определения условий равновесия тела на наклонной плоскости, условий равновесия клина и им подобные следует рассматривать с точки зрения приложения закона равенства сил или закона равенства моментов сил к практическим объектам. Следует обратить внимание на то, что основой любого простого механизма является либо рычаг, либо наклонная плоскость, либо их сочетание.

Для характеристики устойчивости тела, имеющего точку опоры или площадь опоры, необходимо уметь находить центр тяжести тела. Главное в этой теме — зависимость степени устойчивости данного тела от положения центра тяжести и от характера его перемещения при малых отклонениях от положения равновесия.

Вопросы для самопроверки

1. Какая сила называется равнодействующей?
2. По какому правилу складываются силы, направленные под углом друг к другу?
3. Как складываются силы, направленные по одной прямой?
4. Как осуществляется разложение силы на составляющие?
5. При каких условиях тело на наклонной плоскости будет в равновесии?
6. В чем заключается условие равновесия клина?
7. Как записывается условие равновесия винта?
8. Чему равна равнодействующая двух параллельных сил?
9. Как найти точку приложения равнодействующей двух параллельных сил?
10. Что называется моментом силы?
11. Каково условие равновесия рычага?
12. Как сформулировать условие равновесия блока?
13. В чем заключается условие равновесия винтового домкрата?
14. Что называется центром тяжести тела? Может ли центр тяжести находиться вне тела?
15. От чего зависит положение центра тяжести тела?
16. Когда тело, закрепленное в одной точке, будет иметь устойчивое положение?
17. При каких условиях тело, имеющее площадь опоры, будет иметь максимально устойчивое положение?

Задачи для закрепления

Задачник под редакцией Знаменского, номера: 238, 239, 243, 255, 257, 262, 258, 273, 274, 343, 311, 316, 322, 328, 290, 292, 293, 301, 314.

Примеры решения задач

Задача 1.1. Два груза: $P_1 = 2$ *кГ* и $P_2 = 8$ *кГ* подвешены один за другим (рис. 3). Определить силу натяжения каждой веревки.

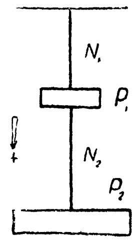


Рис. 3.

Решение. Прежде всего надо определить силы, действующие в этой механической системе. На нижний груз действует его вес P_2 и сила натяжения веревки N_2. На верхний груз действует вес P_1, вес P_2 и сила натяжения веревки N_1. Все названные силы действуют по одной прямой. Выбрав как положительное направление сверху вниз (в сторону, куда направлены векторы P_2 и P_1), запишем для нашего случая закон равенства сил (1.1):

для нижнего груза $P_2 - N_2 = 0$,

для верхнего груза $P_1 + P_2 - N_1 = 0$.

Из этих равенств получается, что $N_1 = 10$ *кГ*, $N_2 = 8$ *кГ*.

Задача 1.2. К середине троса длиной 20 *м* подвешена лампа весом 1,7 *кГ*, вследствие чего трос провисает на 0,1 *м*. Определить силу натяжения троса.

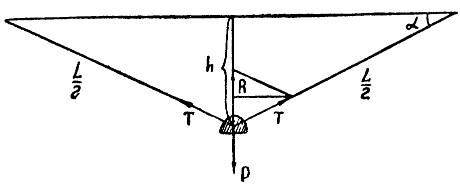


Рис. 4.

Решение. Из рис. 4 видно, что на лампу действует сила P — вес тела. Но лампа неподвижна, находится в статическом равновесии, следовательно, вес P компенсируется силой реакции R. Выберем, как и в предыдущей задаче, положительное направление вниз и запишем условие равновесия этих сил:

$$P - R = 0 \text{ или } P = R.$$

Силу R можно выразить через натяжение T

$$\frac{1}{2} R = T \sin \alpha$$

и записать, что

$$P = 2T \sin \alpha.$$

Sin α есть отношение величины провисания h к $L/2$, половине длины троса:

$$\sin \alpha = \frac{2h}{L}.$$

Значит, сила натяжения троса T будет:

$$T = \frac{P}{2 \sin \alpha} = \frac{PL}{4h}.$$

Вычисление дает: $T = 85$ *кГ*.

Задача 1.3. Найти аналитическое условие неподвижности тела на наклонной плоскости без трения.

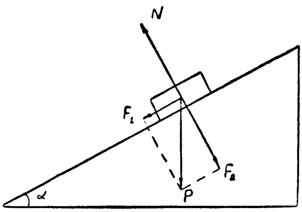


Рис. 5.

Решение. На тело будет действовать вес P и сила реакции N (рис. 5). Разложим силу P на две составляющие, одна из которых перпендикулярна, а другая — параллельна наклонной плоскости. Это будут силы F_2 и F_1:

$$F_2 = P \cos \alpha, \quad F_1 = P \sin \alpha.$$

Сила реакции N будет уравновешиваться силой F_2: они равны по величине и противоположны по направлению. Сила F_1 будет скатывающей. Условимся считать, что она действует в положительном направлении. Значит, для того, чтобы тело находилось в покое, к нему надо приложить силу F, равную F_1 и противоположную по направлению (т. е. отрицательную), чтобы выполнилось условие статического равновесия (1.1):

$$F_1 - F = 0.$$

Из чего находим:

$$F = F_1 = P \sin \alpha.$$

Это выражение и является аналитическим условием равновесия тела на наклонной плоскости без трения.

Задача 1.4. Диск диаметром 0,5 *м* и весом 100 *н* удерживается в покое на наклонной плоскости горизонтально натянутой бечевкой, одним концом прикрепленной к самой верхней точке диска, а другим

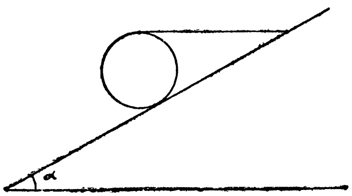


Рис. 6.

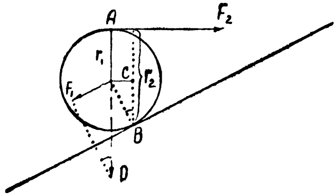


Рис. 7.

к наклонной плоскости (рис. 6). Требуется найти натяжение бечевки, если известно, что наклонная плоскость образует с горизонтом угол 30°.

Решение. Разложим вес P диска на параллельную и перпендикулярную наклонной плоскости составляющие. Составляющая сила F_1 будет той силой, которая стремится скатить диск (рис. 7). Силу натяжения бечевки обозначим через F_2. Найдем моменты этих сил относительно точки касания диска B с наклонной плоскостью. Сила F_1 стремится повернуть диск относительно точки B против часовой стрелки, ее плечом будет радиус диска r_1. Сила F_2 стремится повернуть диск по часовой стрелке, ее плечом будет перпендикуляр r_2 к направлению действия силы, восстановленный из точки B. Так как по условию диск неподвижен, то приложенные к нему моменты сил уравновешены, что, согласно формуле (1.2), аналитически запишется в виде

$$F_2 r_2 - F_1 r_1 = 0.$$

Из рис. 7 легко найти, что

$$r_2 = r_1 + CB = r_1 + r_1 \cos \alpha,$$

$$F_1 = P \sin \alpha.$$

Значит,

$$F_2 = \frac{F_1 r_1}{r_2} = \frac{P \sin \alpha}{1 + \cos \alpha}.$$

В численном виде

$$F_2 = \frac{100\ н \cdot 0{,}5}{1 + 0{,}87} \simeq 27\ н.$$

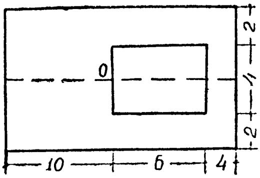


Рис. 8.

Задача 1.5. Определить, где находится центр тяжести однородной пластины с вырезом, изображенной на рис. 8. Размеры даны в сантиметрах.

Решение. Без выреза вес пластины был бы P, а центр тяжести располагался бы в точке O. Обозначим через P_1 вес вырезанной части. Тогда полный вес пластины может быть представлен как равнодействующая двух сил: веса вырезанной части P_1 и веса оставшейся части P_2, каждый из которых приложен в центре тяжести соответствующей фигуры

$$P = P_1 + P_2.$$

Это позволяет свести решение задачи о нахождении центра тяжести сложной фигуры, оставшейся после выреза ее части, к решению задачи о разложении параллельных сил и к отысканию одной из составляющих по заданной равнодействующей и другой составляющей силе. На рис. 9 нанесена схема расположения сил.

Вес P_1 приложен к центру вырезанной фигуры, который находится на расстоянии l от точки O. Вес оставшейся части

$$P_2 = P - P_1$$

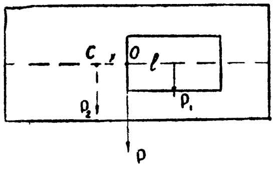


Рис. 9.

приложен в некоторой точке C на расстоянии x от точки O. По правилу сложения параллельных сил расстояния x и l точек приложения сил P_2 и P_1 от точки O должны удовлетворять пропорции

$$\frac{x}{l} = \frac{P_1}{P_2}. \qquad (1.3)$$

Если толщина пластины d, а плотность материала ρ, то

$$P_1 = d\rho g \cdot 6 \cdot 4,$$
$$P = d\rho g \cdot 20 \cdot 8,$$
$$P_2 = d\rho g (20 \cdot 8 - 6 \cdot 4) = d\rho g \cdot 136,$$

где g — ускорение силы тяжести.

Подставив значения P_1, P_2 и $l = 3$ *см* в уравнение (1.3), находим, что центр тяжести пластины с вырезом располагается на расстоянии

$$x = 0{,}53 \text{ см}$$

от центра тяжести сплошной пластины.

2. КИНЕМАТИКА

Требования программы

Равномерное прямолинейное движение. Скорость. Единицы скорости. Уравнение равномерного движения. Графики скорости и пути равномерного движения.

Переменное движение. Средняя и мгновенная скорости. Ускорение. Единицы ускорения. График скорости равнопеременного движения с начальной скоростью. Уравнение равнопеременного движения с начальной скоростью (вывод на основе графика скорости).

Свободное падение тел. Ускорение свободно падающего тела. Влияние сопротивления воздуха.

Механическим движением называется изменение положения данного тела по отношению к другим телам. Важно понять относительность движения и покоя, то есть то, что перемещение тела можно обнаружить только по отношению к другим телам.

Механические движения различаются по виду траектории (прямолинейные или криволинейные) и по отсутствию или присутствию ускорения (равномерные, неравномерные).

Изучение различных видов механических движений является основной задачей отдела механики, называющегося кинематикой. Кинематика изучает движение, не интересуясь причинами, его порождающими. Основные кинематические характеристики — это скорость и ускорение. Обе эти величины являются векторными, что требуется учитывать при решении задач путем выбора положительного направления. (Положительное направление обычно выбирают в сторону отсчета пути.)

Довольно часто учащиеся не четко усваивают общее определение средней скорости неравномерного движения, по причине чего заменяют его определением средней скорости равнопеременного движения и получают ошибочные результаты.

Для любого неравномерного движения (с произвольными ускорениями, с остановками) средняя скорость определяется как отношение пройденного пути ко всему затраченному на это времени:

$$v_{ср} = \frac{s}{t}. \tag{1.4}$$

Что же касается равнопеременного движения (равноускоренного или равнозамедленного), то оно является частным случаем неравномерного движения, когда ускорение постоянно и его можно найти по формуле:

$$a = \frac{v_t - v_0}{t}. \tag{1.5}$$

Для равнопеременного движения можно заранее вычислить путь, если известны начальная скорость и ускорение. Формулу пути обычно пишут в виде

$$s = v_0 t + \frac{at^2}{2}.$$

Но если заменить в последнем члене ускорение a по формуле (1.5), то формула пути примет другой вид

$$s = \frac{v_0 + v_t}{2} t.$$

Подставив это выражение в определение средней скорости (1.4), получим

$$v_{ср} = \frac{v_0 + v_t}{2}. \tag{1.6}$$

Оказывается, средняя скорость равна полусумме начальной и конечной скоростей только в случае равнопеременного движения и ни в каком другом. Поэтому, встречая задачи на нахождение средней скорости, надо прежде всего определить, с каким движением приходится иметь дело, и лишь после этого употреблять либо формулу (1.4), либо формулу (1.6).

После разбора материала о равномерном прямолинейном движении, о равнопеременном прямолинейном движении и о свободном падении тел полезно обратить внимание на тот факт, что самым общим из них является равнопеременное прямолинейное движение, из которого два остальных получаются как частный случай. Действительно, из формул

$$v_t = v_0 + at,$$

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

при $a = 0$ получаем $v_t = v_0$ (движение с постоянной скоростью) и формулу пути равномерного и прямолинейного движения

$$s = v_0 t.$$

Свободное падение тел является частным видом равнопеременного движения, а именно равноускоренным с постоянным ускорением g, причем направлено оно вертикально вниз. Применяя общие формулы свободного падения тел, нужно всегда внимательно разобраться, в каком направлении отсчитывается проходимый телом путь, так как начальная скорость может иметь направление, противоположное направлению ускорения свободного падения.

При решении многих задач полезна формула разности квадратов скоростей

$$v_t^2 - v_0^2 = 2as.$$

Вывести ее можно двояким путем.

Первый путь. Из формулы $v_t = v_0 + at$ находим время

$$t = \frac{v_t - v_0}{a}$$

и подставляем в формулу

$$s = v_0 t + \frac{at^2}{2}.$$

Выполнив элементарные преобразования, получим то, что нужно.

Второй путь. Совместно решаем уравнения

$$s = v_{ср} t,$$

$$v_{ср} = \frac{v_0 + v_t}{2},$$

$$t = \frac{v_t - v_0}{a},$$

исключая в первой формуле среднюю скорость и время. Получаем

$$s = \frac{v_0 + v_t}{2} \cdot \frac{v_t - v_0}{a}$$

или окончательно

$$v_t^2 - v_0^2 = 2as.$$

Вопросы для самопроверки

1. Дайте определение прямолинейного, криволинейного, равномерного и неравномерного движений.
2. Что называется средней скоростью неравномерного движения?
3. Что называется мгновенной скоростью?
4. Что называется ускорением?
5. Какое движение называется равноускоренным?
6. Какое движение называется равнозамедленным?
7. Как из формулы, определяющей ускорение, получить формулу для вычисления скорости равноускоренного движения с начальной скоростью? Без начальной скорости?
8. Выведите формулу для вычисления пути в равноускоренном движении с начальной скоростью и без начальной скорости.
9. Как вывести формулу разности квадратов скоростей из формул:

$$a = \frac{v_t - v_0}{t} \text{ и } s = v_0 t + \frac{at^2}{2}?$$

10. Какими формулами описывается равноускоренное движение? Равнозамедленное движение?
11. Каким движением является свободное падение тел?

12. Какими формулами описывается свободное падение тел?

13. Какими формулами описывается движение тела, брошенного вертикально вверх?

Задачи для закрепления

Задачник под редакцией П. А. Знаменского, номера: 6, 7, 13, 14, 15, 18, 20, 24, 25, 27, 30, 32, 34, 36, 42, 74, 76, 77, 78, 87, 91, 131, 132, 140, 151, 152, 163, 168, 170.

Примеры решения задач

Задача 2.1. Какую скорость должна иметь моторная лодка, чтобы пересечь реку перпендикулярно со скоростью 3,2 *м/сек*, если скорость течения равна 1,2 *м/сек*?

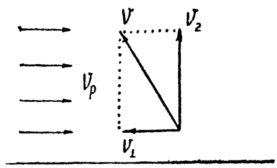


Рис. 10.

Решение. Чтобы моторную лодку не сносило вбок, ее скорость v должна иметь составляющую v_1, равную скорости реки v_p и противоположную по направлению (рис. 10).

Поскольку v_2 нам известна, полная скорость

$$v = \sqrt{v_1^2 + v_2^2} = 3,4 \text{ м/сек}.$$

Задача 2.2. Самолет касается посадочной полосы, имея скорость 100 *м/сек*. По истечении 20 *сек* он останавливается. Найти ускорение и длину тормозного пути.

Решение. Конечная скорость самолета равна нулю, следовательно, ускорение будет отрицательным:

$$a = \frac{v_t - v_0}{t} = -\frac{v_0}{t}.$$

Подставляя выражение для ускорения в формулу пути при равноускоренном движении, находим длину тормозного пути:

$$s = v_0 t + \frac{at^2}{2} = v_0 t - \frac{v_0 t^2}{t \cdot 2} = \frac{1}{2} v_0 t.$$

Можно использовать также формулу разности квадратов скоростей

$$v_t^2 - v_0^2 = 2as.$$

Будем иметь

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

откуда

$$s = \frac{1}{2}v_0 t.$$

После подстановки численных данных получим

$$a = -5 \text{ м/сек}^2, \quad s = 1000 \text{ м}.$$

Задача 2.3. Самолет летит на цель под углом α к горизонту. На высоте H, имея скорость v, он сбрасывает груз. На каком расстоянии s от цели (по горизонтали) требуется освободить груз, чтобы он упал в нужное место?

Решение. В момент освобождения груз будет иметь скорость самолета v_0. Эту скорость можно разложить на горизонтальную v_1 и вертикальную v_2 составляющие. Горизонтальная составляющая будет постоянна за все время падения, а вертикальная составляющая под действием ускорения свободного падения будет меняться по формуле

$$v = v_2 + gt.$$

За время t груз пройдет по вертикали путь

$$H = v_2 t + \frac{gt^2}{2}, \tag{1.7}$$

а по горизонтали

$$s = v_1 t. \tag{1.8}$$

Из уравнения (1.7) находим время падения

$$t = \frac{1}{g}\left(-v_2 + \sqrt{v_2^2 + 2gH}\right)$$

(перед корнем знак плюс, так как отрицательным время быть не может) и подставляем в уравнение (1.8);

$$s = v_1 t = \frac{v_1}{g}\left(-v_2 + \sqrt{v_2^2 + 2gH}\right).$$

Как видно из рис. 11,

$$v_1 = v_0 \cos\alpha, \quad v_2 = v_0 \sin\alpha,$$

поэтому окончательно:

$$s = \frac{v_0 \cos\alpha}{g}\left(-v_0 \sin\alpha + \sqrt{v_0^2 \sin^2\alpha + 2gH}\right).$$

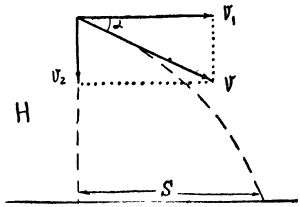


Рис. 11.

Задача 2.4. Два тела бросаются вертикально вверх из одной точки одно вслед за другим с интервалом в T сек. с одинаковыми начальными скоростями v_0. Через какое время оба тела встретятся?

Решение. Они встретятся, после того как первое тело, достигнув максимальной высоты, начнет падать. Пусть t — время движения первого тела до встречи. Оно складывается из времени подъема v_0/g и времени падения t_1, так что $t = v_0/g + t_1$. Второе тело будет двигаться до встречи $t - T$ сек. Путь первого тела складывается из двух:

$$H_{\text{макс}} + H_1 = \frac{v_0^2}{2g} + \frac{gt_1^2}{2}.$$

Путь второго тела равен

$$H_2 = v_0(t - T) - \frac{g(t-T)^2}{2}.$$

Для решения используем тот факт, что $H_2 + H_1 = H_{\text{макс}}$. Неизвестное нам время падения выразим как $t_1 = t - v_0/g$. Получается уравнение

$$v_0(t-T) - \frac{g(t-T)^2}{2} + \frac{g\left(t - \frac{v_0}{g}\right)^2}{2} = \frac{v_0^2}{2g},$$

решая которое, найдем: $t = \frac{v_0}{g} + \frac{T}{2}$.

Дополнительный материал

О средней скорости

Допустим, что автомобиль проехал 60 *км*, из которых первые 30 он двигался со скоростью $20\,\frac{км}{час}$, а вторые 30 — со скоростью $60\,\frac{км}{час}$. Какова средняя скорость?

Казалось бы, $v_{\text{ср}} = \frac{v_1 + v_2}{2} = 40\ \frac{км}{час}$.

Однако такой ответ будет неверным, точнее неподходящим.

Дело в том, что операцию усреднения можно проводить по отношению к различным физическим величинам, в данном случае по отношению ко времени или к пути. С практической точки зрения имеет смысл интересоваться скоростью, средней по отношению ко времени нахождения пассажира в пути.

Если t_1 — время, затраченное на первую половину пути (скорость v_1), а t_2 — время, затраченное на вторую половину пути (скорость v_2), то полный путь

$$s = v_1 t_1 + v_2 t_2.$$

С другой стороны,

$$s = v_{\text{ср}} (t_1 + t_2),$$

следовательно,

$$v_{\text{ср}} = \frac{v_1 t_1 + v_2 t_2}{t_1 + t_2}. \tag{1.9}$$

Определив из условий задачи t_1 и t_2, по формуле (1.9) найдем, что

$$v_{\text{ср}} = 30\ \frac{км}{час}.$$

Как видно, найденный результат отличается от полученного вначале.

Теперь обобщим наши рассуждения.

Время $t_1 + t_2$ представляет собой полное время нахождения в пути. Обозначим его через t. Тогда формулу (1.9) можно переписать в виде

$$v_{\text{ср}} = \frac{1}{t}(v_1 t_1 + v_2 t_2). \tag{1.10}$$

В скобках стоит сумма произведений из заданных в задаче величин скоростей v_i на соответствующее время t_i. Если бы по условию задачи было дано четыре различных скорости, то формула (1.10) имела бы вид:

$$v_{\text{ср}} = \frac{1}{t}(v_1 t_1 + v_2 t_2 + v_3 t_3 + v_4 t_4), \tag{1.11}$$

причем

$$t = t_1 + t_2 + t_3 + t_4.$$

Формулы (1.10) и (1.11) позволяют высказать следующее правило нахождения средней по времени скорости: надо взять сумму произведений каждой скорости на время и разделить эту сумму на все время движения.

Попробуем теперь усреднить скорость по пути, для чего вместо времени подставим величину пути. Правило, очевидно, получится следующим:

Чтобы получить среднюю по пути скорость, надо взять сумму произведения каждой скорости на соответствующий отрезок пути и разделить эту сумму на весь путь. Применительно к нашей задаче будем иметь:

$$v_{\text{ср}} = \frac{1}{s}(v_1 s_1 + v_2 s_2)$$

или в числах

$$v_{\text{ср}} = \frac{20 \cdot 30 + 60 \cdot 30}{60} = \frac{30\,(20 + 60)}{60} = \frac{20 + 60}{2} = 40\,\frac{\textit{км}}{\textit{час}}.$$

Оказывается, первая попытка получить среднюю скорость, объявленная неверной, представляла не что иное, как усреднение скорости по пути.

В самом общем случае усреднение физической величины a по величине b производится по правилу:

$$a_{\text{ср}} = \frac{1}{b}(a_1 b_1 + a_2 b_2 + \ldots), \tag{1.12}$$

где

$$b = b_1 + b_2 + \ldots$$

Но при этом надо иметь в виду, что усреднение не по всякой величине будет иметь смысл. В большинстве случаев физические величины усредняют по времени.

Задача 2.5. Велосипедист едет по пересеченной местности. Когда дорога идет в гору, скорость его составляет $v_1 = 5\,\frac{\textit{км}}{\textit{час}}$, а с горы $v_2 = 20\,\frac{\textit{км}}{\textit{час}}$. Какова его средняя скорость, если общий путь, пройденный при подъеме, такой же, как и при спуске?

Решение. Обозначим через s путь, пройденный при подъеме или при спуске. Тогда время подъема

$$t_1 = \frac{s}{v_1},$$

а время спуска

$$t_2 = \frac{s}{v_2}.$$

Воспользуемся формулой (1.10) для вычисления средней по времени скорости, подставив в нее наши значения t_1 и t_2. Получим:

$$v_{\text{ср}} = \frac{1}{\frac{s}{v_1} + \frac{s}{v_2}} \left(v_1 \cdot \frac{s}{v_1} + v_2 \cdot \frac{s}{v_2} \right) = \frac{2v_1 \cdot v_2}{v_1 + v_2}.$$

Подставляя числа, приходим к следующему результату:

$$v_{\text{ср}} = 8 \frac{\textit{км}}{\textit{час}}.$$

Классическая механика, теория относительности, квантовая механика

Ту механику, с которой мы привыкли иметь дело в повседневной практике, называют классической механикой. Классическая механика базируется на простых и очевидных законах. Еще полвека назад эти законы считались незыблемыми, абсолютно верными во всех случаях жизни. Однако бурное развитие новейшей физики опрокинуло такие взгляды. Выдающийся физик XX века Эйнштейн доказал, что законы классической механики справедливы не для всех случаев движения. Более того, они справедливы и не для всех тел!

Рассмотрим следующий частный пример, показывающий ограниченность применения формул ускорения классической механики. Допустим, тело выходит из состояния покоя с постоянным ускорением $a = 20 \frac{\textit{м}}{\textit{сек}^2}$. Спрашивается, какой скорости оно достигнет через год движения? Казалось бы,

$$v = at = 20 \frac{\textit{м}}{\textit{сек}^2} \cdot 365 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60 \ \textit{сек} = 630\,720 \frac{\textit{км}}{\textit{сек}}.$$

Но результат более чем вдвое превосходит скорость света, что с физической точки зрения является абсурдом: ведь ни одно тело не может двигаться со скоростью, превышающей скорость света! Из этого примера сразу становится ясно, что классическая механика не годится для описания движений с очень большими скоростями.

В 1905 г. Эйнштейн предложил внести изменения в законы классической механики. Новая теория получила название „теория относительности“ (релятивистская механика) и с того времени не раз подвергалась всесторонней проверке в многочисленных экспериментах.

В современной теории относительности правильная формула для связи скорости с ускорением и временем должна быть записана в виде

$$v = \frac{at}{\sqrt{1 + \left(\frac{at}{c}\right)^2}}, \tag{1.13}$$

где c — скорость света, a — постоянное ускорение тела. Из этой формулы видно, что когда величина at становится гораздо больше c, то знаменатель стремится к at/c и скорость приближается к

$$v = \frac{at}{\frac{at}{c}} = c.$$

С другой стороны, если at много меньше c, то

$$\sqrt{1 + \left(\frac{at}{c}\right)^2} \simeq 1$$

и $v = at$ с большой степенью точности.

Конечно, для скоростей, с которыми нам приходится иметь дело в повседневной жизни, разумно применять формулу

$$v = at$$

и все другие, которые дает классическая механика.

В настоящее время совершенно ясно, что классическая механика Ньютона — это лишь частный случай теории относительности. Классическая механика является прекрасным приближением к действительности только до тех пор, пока мы имеем дело с движением тел, состоящих из большого числа атомов (макроскопических тел), скорости которых малы по сравнению со скоростью света. Но она перестает быть справедливой, когда скорость движения становится сравнимой со скоростью света.

Теория относительности уже проверялась экспериментально. Весьма точные наблюдения над некоторыми небесными объектами (например над планетой Меркурий, скорость которой при движении по орбите вокруг солнца достигает 100 *км/сек)* позволяют обнаружить явления, которые объясняются лишь на основе законов теории относительности.

Очень резко проявляются отклонения от классической механики при наблюдении отдельных атомов, электронов и других элементарных частиц. Это говорит о том, что законы классической механики перестают быть справедливыми и при описании поведения микроскопических тел.

Отдельные элементарные частицы, например отдельные электроны, проявляют свойства, отличные от тех, которые вообще могут быть приписаны частице в том смысле, в каком употребляется слово „частица" в механике. Опыты убеждают нас в том, что электроны обладают одновременно корпускулярными и волновыми свойствами, а масса их меняется, если меняется скорость.

Законы движения микроскопических тел устанавливаются так называемой квантовой механикой.

В классической механике считается, что масса тела не зависит от скорости его движения. Однако это не так. При очень больших скоростях, близких к скорости света, масса тела начинает изменяться. Опыт показывает, что масса возрастает по закону, выведенному Эйнштейном:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 + \left(\frac{v}{c}\right)^2}},$$

где m_0 — масса покоя, а c — скорость света.

Конечно, при обычных скоростях, когда отношение v/c стремится стать очень малым, разумно считать массу не зависящей от скорости.

Итак, классическая механика описывает медленные, по сравнению со скоростью света, движения больших тел. Теория относительности объясняет скорости движения, заметно сравнимые со скоростью света. А квантовая механика — это механика молекул, атомов, элементарных частиц.

В заключение решите следующую задачу.

Тело выходит из состояния покоя с постоянным ускорением и движется так в течение целого года. Пользуясь формулой теории относительности, найдите его конечную скорость. Если бы тело ускорялось в течение 10 лет, на сколько его скорость отличалась бы от скорости света?

О теории относительности можно узнать подробнее из брошюр: Л. Д. Ландау, Ю. Б. Румер, „Что такое теория относительности“, М., 1959 и Ю. И. Соколовский, „Сюрпризы околосветовых скоростей“, М., 1963.

3. ДИНАМИКА

Требования программы

Первый закон Ньютона (закон инерции).

Второй закон Ньютона. Сила. Масса и вес тела. Плотность и удельный вес. Единицы массы: килограмм, грамм. Единицы силы: ньютон, дина, килограмм-сила.

Третий закон Ньютона. Количество движения. Закон сохранения количества движения. Понятие о реактивном движении. К. Э. Циолковский — основоположник учения о реактивном движении. Закон всемирного тяготения.

Динамика вскрывает причины, порождающие движение. Нужно запомнить, что это всегда будут те или иные силы. Любая сила, как скорость или ускорение, является вектором, следовательно, решая задачи динамики, нужно учитывать, в каком направлении, положительном или отрицательном, действуют силы. Силы складываются по правилам сложения векторов.

Основу динамики составляют три закона Ньютона.

Первый закон. Если силы действуют на тело так, что их результирующая равна нулю, то тело сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения. Если

$$F_p = 0 \text{ или } F_1 + F_2 + \dots + F_n = 0,$$

то

$$a = 0, \; v = \text{const или } v = 0.$$

То же самое имеет место, если на тело вообще не действуют никакие силы.

Второй закон. Если силы действуют на тело так, что их результирующая не равна нулю, то она будет сообщать телу ускоренное движение. При этом результирующая сила обязательно будет равна произведению массы тела на его ускорение

$$F_p = ma, \text{ или } F_1 + F_2 + \dots + F_n = ma.$$

Третий закон. При любом взаимодействии двух покоящихся или движущихся тел сила, с которой первое тело воздействует на второе, равна по величине и направлена противоположно силе, с которой второе тело воздействует на первое

$$F_{AB} = -F_{BA}.$$

Нужно уметь правильно формулировать все три закона.

Формулируя свои законы, Ньютон специально указал, что все три закона движения справедливы только тогда, когда наблюдатель находится в покое или движется равномерно и прямолинейно по отношению к неподвижным звездам. Законы нарушаются, если сам наблюдатель движется с ускорением.

Следует обратить внимание на общность второго закона Ньютона. Из него легко получить первый закон, который фактически представляет собой следствие второго, а также закон изменения количества движения.

Примем ускорение a во втором законе Ньютона равным нулю. Тогда сила F_p тоже равна нулю, то есть, если тело движется с постоянной скоростью или пребывает в покое, на него либо вообще не действуют никакие силы, либо они действуют так, что их результирующая равна нулю

$$F_p = F_1 + F_2 + F_3 + \dots = 0.$$

Но это как раз и есть содержание первого закона Ньютона.

Если во втором законе Ньютона заменить ускорение по известной формуле

$$a = \frac{v - v_0}{t},$$

то получим выражение

$$F = m\frac{v - v_0}{t},$$

которое можно переписать в виде

$$Ft = mv - mv_0. \qquad (1.14)$$

Время t здесь имеет смысл времени, в течение которого произошло изменение скорости движения массы m от начальной v_0 до конечной v, или, что все равно, время действия силы, вызвавшей это изменение. (Под силой F понимается результирующая сила.) Произведение Ft называется импульсом силы; импульс — векторная мера действия силы. Произведение mv называется количеством движения. Очевидно, что эта величина тоже векторная. Значит, при решении задач с применением закона движения надо учитывать направление действия силы или направления скоростей. Выражение (1.14) читается так: импульс силы (или сил), действующий на тело за некоторый промежуток времени, равен изменению количества движения тела за тот же промежуток времени. По сути дела, это другая формулировка второго закона Ньютона. Заметим, что изменение количества движения может происходить не только за счет длительности действия неизменной силы, но и за счет изменения самой силы в процессе действия.

Когда целесообразно применять закон равенства импульса сил изменению количества движения?

Этот закон целесообразно применять для решения таких задач динамики, в которых дано время или, наоборот, надо найти время, поскольку время входит в выражение импульса. В качестве примера приведем решение следующей задачи.

Задача 3.1. По горизонтальной дороге движется автомобиль. Шофер начинает тормозить и останавливает машину через t сек. Найти коэффициент трения колес о дорогу.

Решение. В условии задачи дано время, следовательно, для решения надо применить формулу (1.14). Конечная скорость автомобиля равна нулю. Начальную обозначим через v_0. Сила трения, останавливающая автомобиль, равна коэффициенту трения, умноженному на силу нормального давления: $f = kN$. Но, так как автомобиль движется по горизонтальной дороге, сила нормального давления равна весу автомобиля: $N = P$. Выше указывалось, что импульс силы — векторная величина. В формуле (1.14) импульс силы имеет знак плюс только тогда, когда сила F направлена в ту же сторону, что и скорость. В нашем случае в качестве действующей силы выступает сила трения, а она всегда направлена против движения. Поэтому импульс силы трения будет отрицательным:

$$Ft = -kNt = -kPt.$$

Обозначив массу автомобиля как P/g, на основании формулы (1.14) запишем:

$$-kPt = -\frac{P}{g}v_0, \qquad (v_t = 0),$$

откуда найдем, что

$$k = \frac{v_0}{gt}.$$

Часто количество движения обозначают буквой K: $K = mv$. В таком обозначении формула (1.14) примет вид

$$Ft = K_2 - K_1. \tag{1.15}$$

Если сила равна нулю, то количество движения тела не меняется, и тогда имеет место закон сохранения количества движения. Он гласит, что при отсутствии внешних сил сумма количеств движения двух тел остается неизменной.

Пусть сталкиваются два тела с массами m_A и m_B, но при этом на них не действуют никакие внешние силы. Тогда в механической системе, образуемой этими двумя телами, произойдет обмен количеством движения, который будет подчиняться формуле

$$K_A + K_B = K'_A + K'_B$$

или

$$m_A v_A + m_B v_B = m_A v'_A + m_B v'_B,$$

где v_A и v_B — скорости тел до соударения,

v'_A и v'_B — скорости тел после соударения.

Закон сохранения количества движения является точным законом природы. До сих пор в самых разнообразных экспериментах не обнаружено ни одного случая нарушения этого закона.

Законы динамики не являются сложными для усвоения, однако умение применять их при решении задач требует достаточной тренировки. Особенно много ошибок допускают, применяя второй и третий законы к движущимся телам. Ввиду этого при изучении данной темы рекомендуется решить возможно большее количество задач на взаимодействие тел.

В школьном курсе физики в раздел „Динамика" вводится понятие о системах единиц измерения. Напомним, что в настоящее время в Советском Союзе принята в качестве предпочтительной международная система единиц СИ. Ее основные механические единицы следующие:

единица длины — метр (*м*);
единица массы — килограмм (*кг*);
единица времени — секунда (*сек*).

Пользуясь соответствующими формулами, можно вывести производные единицы измерения. Имеем:

для скорости — $[v] = \frac{[s]}{[t]} = \frac{м}{сек}$;

для ускорения — $[a] = \frac{[v_t - v_0]}{[t]} = \frac{м}{сек^2}$;

для силы — $[F] = [m] \cdot [a] = \frac{кг \cdot м}{сек^2} = н.$

Единицей измерения силы в системе СИ является ньютон. Связь между ньютоном и такими единицами измерения силы, как *Г*, *кГ* (внесистемные) или дина (система СГС), выводится с помощью формулы

$$P = mg.$$

В самом деле, тело, имеющее массу 1 *кг*, весит 1 *кГ*, т. е. выполняется соотношение

$$1\,кГ = 1\,кг \cdot 9{,}8\,\frac{м}{сек^2} = 9{,}8\,н,$$

С другой стороны,

$$1\ кГ = 1000\ г \cdot 980\ \frac{см}{сек^2} = 9{,}8 \cdot 10^5\ дн.$$

Следовательно,

$$1\ н = 10^5\ дн.$$

При решении задач окончательный результат надо стараться выражать в единицах системы СИ. Допускается также (там, где это удобнее) пользование системой СГС.

Обе системы единиц, СИ и СГС, требуется знать твердо и уметь безошибочно переводить наименованные величины из одной системы в другую.

Закон всемирного тяготения следует запомнить в той форме (и в тех единицах измерения), в какой он дан в учебнике.

Вопросы для самопроверки

1. При каких условиях тело сохраняет состояние покоя или прямолинейного равномерного движения?
2. Какие примеры проявления инерции тел вы можете привести?
3. Можно ли мгновенно изменить скорость тела?
4. Что является причиной изменения скорости тела?
5. Как будет двигаться тело, если действующие на него силы уравновешены?
6. Какие виды сил вы знаете?
7. Что называется массой тела?
8. Чем отличается масса тела от его веса?
9. Как связаны между собой масса тела, действующая на него сила и ускорение?
10. Обязательно ли присутствует сила там, где есть ускорение?
11. Назовите основные механические единицы системы СИ и системы СГС.
12. Как получить размерность скорости, ускорения и силы в обеих системах?
13. Как устанавливается связь между единицами измерения силы ньютоном, диной и килограммом?
14. На столе стоит ваза. С какими силами ваза и стол действуют друг на друга? Уравновешивают ли друг друга эти силы? Почему?

15. Что называется количеством движения тела?

16. Сформулируйте закон сохранения количества движения.

17. Каков физический смысл закона всемирного тяготения?

Задачи для закрепления

Задачник под редакцией П. А. Знаменского, номера: 52, 53, 54, 55, 56, 58, 61, 64, 65, 68, 72, 94, 95, 96, 97, 102, 104, 105, 110, 116, 119, 122, 123, 126, 241.

Примеры решения задач

Задача 3.2. Брусок весом P зажат двумя досками с силой F. Коэффициент трения между поверхностью бруска и доской равен k. Какую силу необходимо приложить к бруску, чтобы вытолкнуть его вниз? Вытолкнуть вверх?

Решение. Брусок сам не падает, следовательно, силы трения, действующие на обе поверхности, больше веса: $2f > P$. Изобразим характер действия сил для первого случая. Вес приложен к центру тяжести бруска и направлен вниз. Силы трения будут одинаковы на обеих поверхностях и, если брусок выталкивается вниз, направлены противоположно движению, т. е. вверх. Сложим их как параллельные силы: получим результирующую величины $2f$, приложенную тоже к центру тяжести бруска. Так как вес частично компенсирует силы трения, для выталкивания бруска остается подействовать на него небольшой силой F_1, направленной вниз и приложенной к центру тяжести. Картина распределения сил изображена на рис. 12.

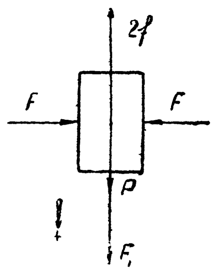


Рис. 12.

Согласно первому закону Ньютона, условием равномерного движения тела является равенство нулю результирующей всех сил. При этом надо учесть векторный характер сил. Выберем положительным направление вниз. Тогда в нашем случае условие равномерного движения запишется в виде

$$F_1 + P - 2f = 0.$$

Имея в виду, что

$$f = kF,$$

найдем, какую силу F_1 необходимо приложить, чтобы вытолкнуть брусок вниз:

$$F_1 = 2kF - P.$$

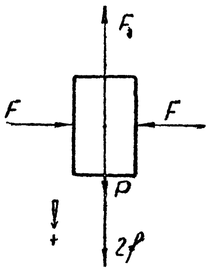


Рис. 13.

Картина распределения сил во втором случае показана на рис. 13. Уравнение равномерного движения будет

$$-F_2 + P + 2f = 0.$$

Сила F_2, которую необходимо приложить, чтобы вытолкнуть брусок вверх, равна

$$F_2 = 2kF + P.$$

Задача 3.3. Двое мальчиков тянут за динамометр в противоположные стороны. Каково показание динамометра, если первый мальчик может развивать силу 250 *н*, а второй 100 *н*?

Решение. 100 *н*, ибо величина действующей силы не может превысить величину противодействующей.

Задача 3.4. Тело весом P падает вертикально вниз с ускорением $a_1 = 11$ *м/сек*^{2}. Какой величины дополнительная сила, помимо силы тяжести, действует на тело?

Решение. Указанное ускорение тело имеет под действием результирующей силы F_p, слагаемые которой видны на рис. 14:

$$F_p = P + F_1.$$

Рис. 14.

Но, с другой стороны,

$$F_p = ma_1.$$

Значит, дополнительная сила определяется как

$$F_1 = m(a_1 - g) = \frac{P}{g}(a_1 - g).$$

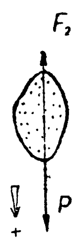


Рис. 15.

Задача 3.5. Тело весом P падает вертикально вниз с ускорением $a_2 = 5$ *м/сек*^{2}. Как велика сила сопротивления воздуха?

Решение. Согласно рис. 15,

$$F_p = P - F_2 = ma_2,$$

откуда

$$F_2 = P - ma_2 = m(g - a_2).$$

Задача 3.6. На горизонтальной поверхности находится брусок весом Q, связанный нитью с грузом, вес которого P. Нить перекинута через блок, как показано на рис. 16. Под действием груза брусок равноускоренно движется к краю стола. Найти величину ускорения и силу натяжения нити. Трением пренебречь.

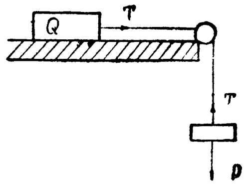


Рис. 16.

Решение. Прежде всего рассмотрим силы, действующие в системе. На брусок действует сила натяжения нити T. На груз действует сила натяжения нити T и вес P. Схема действия сил показана на рис. 11. По второму закону Ньютона результирующая сила равна массе, умноженной на ускорение. Применим второй закон к бруску, масса которого Q/g. Получим

$$T = \frac{Q}{g} a. \qquad (1.16)$$

Применяя второй закон к грузу, учтем, что на него действует не одна, а две силы, результирующая которых будет $P - T$. Во втором законе должна фигурировать результирующая сила, если на тело действует несколько сил. Значит, должно быть

$$P - T = \frac{P}{g} a. \qquad (1.17)$$

Так как полная движущаяся система состоит из двух масс, причем их ускорения одинаковы, сложим уравнение (1.16) с уравнением (1.17). Так найдем силу, действующую на массу:

$$P = \left(\frac{P}{g} + \frac{Q}{g}\right) = a.$$

Но величина P, так же как и Q, по условию задачи известна. Поэтому искомое уравнение будет

$$a = \frac{P}{P + Q} \cdot g.$$

Сила натяжения нити T находится подстановкой выражения для a в уравнение (1.16):

$$T = \frac{PQ}{P+Q}.$$

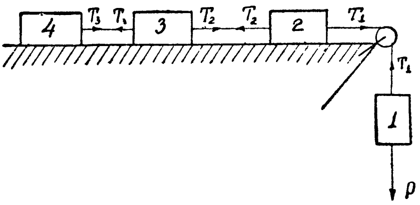


Рис. 17.

Задача 3.7. На горизонтальной плоскости лежат три связанных нитью одинаковых бруска весом P каждый. На нити, прикрепленной к этим брускам и перекинутой через неподвижный блок, подвешен такой же брусок. С каким ускорением движется эта система и какова сила натяжения нити между последним и предпоследним брусками?

Решение. Условия задачи 3.7 отличаются от условий задачи 3.6 количеством брусков на горизонтальной плоскости, но метод решения остается тем же. Прежде всего обозначим действующие на массы силы, как показано на рис. 17. Далее запишем второй закон Ньютона для каждого груза. (Массы брусков одинаковы и равны $m = P/g$.)

Для 1-го: $P - T_1 = ma$,
для 2-го: $T_1 - T_2 = ma$,
для 3-го: $T_2 - T_3 = ma$,
для 4-го: $T_3 = ma$.

Сложив эти четыре уравнения, получим второй закон Ньютона для всей системы, или уравнение движения системы:

$$P = 4ma,$$

из которого найдем величину ускорения:

$$a = \frac{P}{4m} = \frac{mg}{4m} = \frac{1}{4}g.$$

Натяжение нити между третьим и четвертым брусками будет

$$T_3 = m \cdot \frac{1}{4}g = \frac{1}{4} \cdot P.$$

Задача 3.8. На столе лежат два связанных нитью груза (рис. 18). Масса левого m_1, масса правого m_2. К левому грузу приложена сила F_1, к правому F_2. Сила F_2 больше F_1 и противоположна по направлению. Коэффициент трения для левого груза k_1, для правого k_2. С каким ускорением движутся грузы и какова сила натяжения соединяющей их нити?

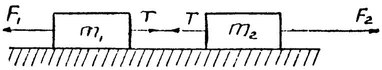


Рис. 18.

Решение. Следуя тому же методу, что и в предыдущих задачах, запишем второй закон Ньютона для каждого груза. При этом учтем, что сила трения f всегда направлена против направления движения. Получаем уравнения:

для правого груза $F_2 - T - f_2 = m_2 a$,

для левого груза $T - F_1 - f_1 = m_1 a$.

Их сумма дает уравнение движения системы:

$$F_2 - F_1 - (f_1 + f_2) = (m_1 + m_2)\,a.$$

Написав силы трения как

$$f_1 = k_1 m_1 g,$$
$$f_2 = k_2 m_2 g,$$

найдем из уравнения движения величину ускорения:

$$a = \frac{F_2 - F_1 - (k_1 m_1 + k_2 m_2)\,g}{m_1 + m_2}.$$

Сила натяжения нити будет

$$T = m_1 a + F_1 + f_1 = F_1 + k_1 m_1 g + \frac{m_1\,[F_2 - F_1 - (k_1 m_1 + k_2 m_2)\,g]}{m_1 + m_2}.$$

Задача 3.9. С какой силой будет давить на дно шахтной клети груз весом 1000 *н*, если она будет подниматься вверх с ускорением 0,5 *м/сек*^{2}?

Решение. На груз в клети будут действовать две силы: вес P и сила реакции F со стороны пола. Вес направлен вниз, сила реакции — вверх. поэтому, если направление вниз принять за положительное, силу реакции нужно считать отрицательной и писать со знаком минус. По этой же причине надо ставить знак минус и перед ускорением a. Соблюдая правило знаков, запишем второй закон Ньютона:

$$F_p = P - F = -ma,$$

из которого найдем, что $F = P + ma$.

Подставляя данные, получаем:

$$F = 1000\ н + \frac{1000\ н}{g} \cdot 0{,}5\ \frac{м}{сек^2} \cong 1050\ н.$$

Задача 3.10. По горизонтальному пути со скоростью $v_1 = 0{,}1$ *м/сек* катится тележка с песком массой $m_1 = 0{,}5$ *кг*. Навстречу тележке стреляют из воздушного

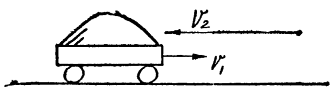


Рис. 19.

ружья пулькой, масса которой $m_2 = 2 \cdot 10^{-3}$ *кг* (рис. 19). Пуля попадает в песок, имея скорость $v_2 = 10$ *м/сек*. С какой скоростью и в каком направлении будет катиться тележка с пулькой?

Решение. Количество движения до удара будет равно количеству движения после удара. До удара тележка обладала количеством движения, равным $m_1 v_1$, а пулька — количеством движения, равным $-m_2 v_2$ (отрицательный знак потому, что скорость v_2 направлена против скорости тележки, которая в данном случае принята за положительную). После удара общая масса стала $m_1 + m_2$, а количество движения $(m_1 + m_2)\,v$, где v предстоит найти. Имеем:

$$m_1 v_1 - m_2 v_2 = (m_1 + m_2)\,v,$$

откуда

$$v = \frac{m_1 v_1 - m_2 v_2}{m_1 + m_2} \simeq 0{,}06\ \frac{м}{сек}.$$

Поскольку скорость не изменила знака, делаем вывод, что тележка продолжает движение в прежнем направлении.

Задача 3.11. Чему равно ускорение силы тяжести на высоте, равной девяти радиусам Земли?

Решение. Вес P, с одной стороны, равен mg, а с другой, если воспользоваться законом всемирного тяготения, равен $\gamma \cdot \frac{mM}{R^2}$, где M и R — соответственно масса и радиус Земли. Поэтому можно написать:

$$mg = \gamma \cdot \frac{mM}{R^2}. \tag{1.18}$$

На высоте H над Землей ускорение будет a, и равенство (1.18) запишется как

$$ma = \gamma \cdot \frac{mM}{(R+H)^2}. \tag{1.19}$$

По условию задачи $H = 9R$. Подставив величину H в уравнение (1.19) и разделив уравнение (1.19) на уравнение (1.18), получим:

$$\frac{a}{g} = \frac{1}{100},$$

или

$$a = 0{,}01\,g.$$

Дополнительный материал

„Парадоксы", связанные с применением второго закона Ньютона

Несмотря на простоту формулировки второго закона Ньютона, правильное применение его часто оказывается делом очень тонким.

Рассмотрим следующий „парадокс".

Деревянный брусок с массой m прижимается к твердой неподвижной стенке (рис. 20) с силой F. Из второго закона Ньютона вытекает, что его ускорение равно:

$$a = \frac{F}{m}.$$

Однако, как мы знаем, такое заключение противоречит опыту. В чем здесь дело?

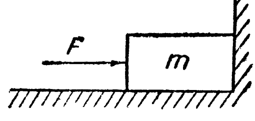


Рис. 20.

Дело в том, что сила F во втором законе Ньютона представляет собой результирующую всех сил, приложенных к телу. В приведенном примере, кроме приложенной силы F, на брусок действует еще сила F' со стороны стенки. По третьему закону Ньютона сила F' равна и противоположна силе F, с которой брусок давит на стенку, т. е. $F' = -F$, а значит, результирующая сила

$$F_p = F - F = 0.$$

Тогда, конечно, второй закон Ньютона дает:

$$a = \frac{0}{m} = 0.$$

Поскольку вначале брусок был в покое, то он и останется в покое. Следовательно, на самом деле никакого противоречия с опытом не получается.

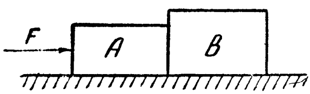


Рис. 21.

Другой „парадокс" касается двух брусков, находящихся на плоской поверхности без трения (рис. 21).

Сила F приложена к бруску A и через него передается бруску B. По третьему закону Ньютона брусок B должен с равной и противоположной силой $-F$ воздействовать на брусок A. Результирующая сила, действующая на брусок A, будет равна сумме приложенной силы F и силы реакции $-F$ бруска B. Следовательно, она будет равна нулю и

$$a = \frac{F_p}{m} = 0.$$

Отсюда следует, что как бы ни была велика сила F, приложенная к бруску A, он никогда не сдвинется с места.

Ошибка в этих рассуждениях заключается в предположении, что сила F полностью передается через брусок A и, следовательно, приложена также к бруску B. Но это, вообще говоря, ниоткуда не следует. Поэтому правильнее будет предположить, что со стороны бруска A на брусок B действует какая-то другая сила F', а на брусок A — сила $F - F'$. Сделав такое предположение, по второму закону Ньютона, применяя его к каждому бруску отдельно, получим:

$$F - F' = m_A a,$$

$$F' = m_B a.$$

Сложив эти равенства, найдем, что

$$F=(m_A+m_B)\cdot a$$

и

$$a=\frac{F}{m_A+m_B}.$$

Вес и невесомость

Любое тело, будучи поднято вверх и предоставлено самому себе, начинает падать вертикально вниз по причине действия веса. Из опыта известно, что вес может сообщать массе тела строго постоянное ускорение, равное 9,8 *м/сек*^{2}, направленное вертикально вниз. Тела, падающие с таким ускорением, находятся в условиях свободного падения.

Свободное падение является лишь частным случаем более общего класса движений по вертикали к поверхности Земли, когда на тело действуют, помимо веса, еще другие силы. Так, капля мыльного раствора падает вниз практически с ускорением свободного падения. Однако, мыльный пузырь такого же веса, что и капля, падает медленно, потому что испытывает со стороны воздуха силу сопротивления, лишь немного меньшую его веса. В потоке воздуха, направленном вертикально вверх, сила сопротивления становится больше веса, и пузырь поднимается вверх.

Если тело движется с ускорением a, то по второму закону Ньютона

$$ma=F_p,$$

где F_p — результирующая всех сил, действующих на тело. В нашем случае F_p представляет собой сумму двух сил: веса P и некоторой дополнительной F_*. Следовательно, можно написать

$$ma=P+F_*. \tag{1.20}$$

Поскольку силы и ускорения — величины векторные, необходимо заранее договориться, какое направление считать положительным, а какое отрицательным. Силы и ускорения, направленные в положительную сторону, условимся писать со знаком плюс, а в отрицательную — со знаком минус. Примем за положительное направление вниз. Тогда второй закон Ньютона, представленный в виде формулы (1.20), будет описывать следующий физический процесс: на тело массы m действуют вес и направленная вниз дополнительная сила F_*, в результате чего оно движется вниз с ускорением

$$a = g + a_*. \tag{1.21}$$

(Ускорение $a_* = F_*/m$ есть дополнительное к g ускорение.)

Если дополнительная сила F_* направлена вверх, но ее величина меньше веса, то

$$ma = P - F_*. \tag{1.22}$$

Тело все равно будет падать вниз, но теперь уже с ускорением, меньшим ускорения свободного падения:

$$a = g - a_*. \tag{1.23}$$

Если дополнительная сила направлена вверх и ее величина больше веса, то

$$-ma = P - F_*. \tag{1.24}$$

Тело движется с ускорением a, направленным вверх и потому отрицательным:

$$-a = g - a_*. \tag{1.25}$$

Последний случай относится, например, к вертикальному взлету ракеты. Анализируя формулы (1.20) и (1.21), нетрудно подтвердить аналитически, что свободное падение есть частный случай равноускоренных вертикальных движений: когда $F_* = 0$, то $a_* = 0$ и $a = g$. Формула (1.20) превращается тогда в формулу $P = mg$.

Рассмотрим в качестве примера лифт, внутри которого стоит человек. Со стороны пола на человека действует сила реакции F_*, причем в покоящемся лифте $F_* = P$. Представим формулу (1.22) в виде

$$F_* = P - ma = m(g - a).$$

Такая запись наглядно показывает, что как только лифт начинает двигаться вниз с ускорением a, сила, действующая на человека со стороны пола, уменьшается. Человек становится легче. Если бы лифт падал с ускорением $a = g$, тогда $F_* = 0$ и для человека наступило бы состояние невесомости. Не только человек, но и все другие предметы в кабине свободно парили бы в воздухе до тех пор, пока кабина не начала останавливаться.

4. РАБОТА, МОЩНОСТЬ, ЭНЕРГИЯ

Требования программы

Механическая работа. Формула работы. Мощность. Энергия. Кинетическая и потенциальная энергия. Переход потенциальной энергии в кинетическую и обратно. Закон сохранения энергии в механике.

Единицы работы и энергии: джоуль, эрг, килограммометр. Единицы мощности: ватт, эрг в секунду, килограммометр в секунду, лошадиная сила.

Существует два вида механической энергии: потенциальная и кинетическая.

Потенциальная энергия определяется взаимным положением тел или частей одного и того же тела и характером взаимодействия между ними. Это — наиболее общее определение потенциальной энергии, и рекомендуется запомнить именно эту формулировку.

Потенциальная энергия определяется с точностью до произвольного постоянного слагаемого. Это означает, что, например, камню, расположенному на некотором расстоянии от земной поверхности, можно приписать произвольную потенциальную энергию. Однако эта неопределенность никак не отражается на физических рассуждениях, поскольку интерес представляет не сама потенциальная энергия, а разность потенциальных энергий как мера возможной работы.

Кинетическая энергия обязана своим существованием движению тела. При изменении движения меняется и кинетическая энергия.

Изменение потенциальной и кинетической энергии по отдельности или совместно представляет собой механическую работу. Работа, следовательно, есть мера как той, так и другой энергии.

Вполне понятно, что единицы измерения работы и энергии одни и те же.

В системе СИ

$$[A] = [F]\,[s] = \textit{н} \cdot \textit{м} = \textit{дж}.$$

В системе СГС

$$[A] = \textit{дн} \cdot \textit{см} = \textit{эрг}.$$

Часто можно встретить также единицу измерения 1 *кГм*. Связь между ними устанавливается с помощью соотношений:

$$1\ кГ = 9{,}8\ н = 9{,}8 \cdot 10^5\ дн, \quad 1\ н = 10^5\ дн, \quad 1\ м = 100\ см.$$

Рассуждения следующие:

$1\ кГм = 1\ кГ \cdot 1\ м = 9{,}8\ н \cdot 1\ м = 9{,}8\ н \cdot м = 9{,}8\ дж$

$1\ кГм = 1\ кГ \cdot 1 \cdot м = 9{,}8 \cdot 10^5\ дн \cdot 10^2\ см = 9{,}8 \cdot 10^7\ эрг.$

$1\ дж = 10^7\ эрг.$

Для того чтобы получить единицы мощности, нужно все указанные единицы работы разделить на 1 *сек*. Получаем соответственно:

$$\frac{дж}{сек}, \quad \frac{эрг}{сек}, \quad \frac{кГм}{сек}.$$

Единица мощности *дж/сек* (в системе СИ) по-другому называется ватт (*вт*). 1000 ватт есть один киловатт (1 *квт*). Соотношение между *вт*, *эрг/сек* и *кГм/сек*, очевидно, такое же, как и между *дж*, *эрг* и *кГм*.

При изучении превращения одного вида энергии в другой важно уделить достаточно внимания закону сохранения энергии и доказательству этого закона в случае падения шара с высоты h.

С падением шара уменьшается потенциальная энергия и увеличивается кинетическая, что указывает на связь этих двух видов энергии. Где-то в середине пути шар обладает определенным количеством и той и другой энергии, в то же время сумма их остается постоянной. Неизменность полной энергии при механическом движении системы и представляет собой закон сохранения механической энергии. Существенно заметить, что это утверждение справедливо лишь при отсутствии перехода механической энергии в тепловую, электрическую и другие виды энергии.

Вопросы для самопроверки

1. Что такое механическая работа?
2. По какой формуле рассчитывают работу?
3. В каких единицах измеряется работа?
4. Что такое механическая мощность?
5. Какие формулы для вычисления мощности вы можете написать?

6. Какими единицами измеряется мощность?

7. Что такое энергия?

8. Что называется потенциальной энергией?

9. Что называется кинетической энергией?

10. Как доказать постоянство суммы кинетической и потенциальной энергии?

11. В чем заключается закон сохранения энергии?

Задачи для закрепления

Задачник под редакцией П. А. Знаменского, номера: 172, 173, 175, 181, 183, 187, 190, 192, 193, 195, 201, 203, 207, 211, 215, 216, 217, 224.

Примеры решения задач

Задача 4.1. Найти работу, которую нужно совершить, чтобы поднять на высоту 5 *м* груз в 2 *Т*, двигая его по наклонной плоскости, составляющей с горизонтом угол 30°. Коэффициент трения равен 0,5.

Решение. Движению груза вверх по наклонной плоскости будут препятствовать две силы: сила трения и составляющая веса, параллельная наклонной плоскости. Разложим вес груза P на две составляющие, параллельную и перпендикулярную наклонной плоскости, как показано на рис. 22. Их величины будут:

$$P_1 = P\sin\alpha \quad \text{и} \quad P_2 = P\cos\alpha.$$

Составляющая, перпендикулярная наклонной плоскости, если ее умножить на коэффициент трения, даст как раз силу трения:

$$f = kP\cos\alpha.$$

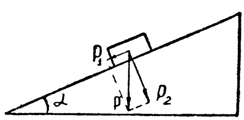


Рис. 22.

Для подъема груза по наклонной плоскости к нему необходимо приложить силу F, равную по величине сумме силы трения и составляющей веса P_1:

$$F = P\sin\alpha + kP\cos\alpha$$

Если длина наклонной плоскости равна l, то нужно затратить работу

$$A = Fs = P(\sin\alpha + k\cos\alpha)\, l.$$

Используя численные данные задачи находим, что эта работа равна примерно 187 *кдж*.

Задача 4.2. Какую мощность развивает спортсмен при прыжке в высоту, если он весит 75 *кГ* и за 0,5 *сек* поднимает свой центр тяжести на высоту 2 *м*?

Решение. Воспользуемся формулой

$$N = \frac{Ph}{t}.$$

75 *кГ* — это 750 *н*, если принять за ускорение силы тяжести 10 *м/сек*^{2}. Производя вычисления, получаем

$$N = \frac{750\ \text{н} \cdot 2\ \text{м}}{0{,}5\ \text{сек}} = 3\ \text{квт}.$$

Задача 4.3. Пуля пробивает доску толщиной s. Описать динамику этого явления.

Решение. До встречи с доской пуля имела скорость v_0 и кинетическую энергию $\frac{1}{2}mv_0^2$. На пробивание доски была потрачена энергия, в результате чего пуля покинула доску с другой скоростью v, меньшей, чем v_0. Ее кинетическая энергия $\frac{1}{2}mv$ тоже стала меньше, чем вначале. Разность начальной и конечной кинетических энергий равняется работе пробивания

$$\frac{mv_0^2}{2} - \frac{mv^2}{2} = A.$$

Но $A = F \cdot s$, где s — толщина доски. Следовательно, сила, действовавшая на доску со стороны пули, будет иметь величину

$$F = \frac{1}{s}\left(\frac{mv_0^2}{2} - \frac{mv^2}{2}\right).$$

Пробивая доску, пуля испытывала ускорение, равное

$$a = \frac{v - v_0}{t},$$

которое будет отрицательным ввиду того, что $v < v_0$. Поэтому и сила $F = ma$ тоже будет отрицательной, то есть направленной против движения пули.

Отрицательным также будет изменение количества движения пули $mv - mv_0$ и ее импульс силы, поскольку

$$Ft = mv - mv_0.$$

Дополнительный материал

Об энергии

В физике, как и во всякой другой науке, имеются разные по широте применения законы. Одни из них справедливы только для какого-то одного явления, например законы равномерного прямолинейного движения. Другие — для большой совокупности явлений, например законы движения Ньютона в механике. Но есть законы, которым подчиняются все без исключения природные явления. Одним из них является закон сохранения энергии. Он абсолютно точен: отступлений от него не наблюдается ни при макро-, ни при микропроцессах.

Философского обоснования закона сохранения энергии пока нет. Нам известно, что существует что-то такое, что мы называем энергией и что не меняется ни при каких превращениях в природе. Есть формулы для расчета определенных численных величин, характеризующих ту или иную форму существования энергии; сложив их, мы получаем всегда одно и то же число. Но почему в природе происходит именно так — пока остается тайной.

Энергия, как известно, имеет множество разных форм или видов: потенциальная энергия (энергия тяготения), кинетическая энергия, упругая, тепловая, электрическая, магнитная, химическая, ядерная, энергия излучения, энергия массы. Когда рассчитывается какая-то одна энергия, то может показаться, что часть ее исчезает или откуда-то появляется. Но если иметь в виду все формы энергии сразу, то сумма всех энергий не меняется. Однако это сложно и часто в таком „всеобъемлющем“ подходе нет необходимости: проще учитывать одну — две формы энергии, но при этом регистрировать „убыль" или „приток" энергии.

Рассмотрим конкретные формы энергии.

Потенциальная энергия тяготения — это вес тела, помноженный на высоту. Вполне понятно, что сильно удаленное от Земли тело будет иметь иную потенциальную энергию, чем в непосредственной близости от нее.

Вообще, потенциальная энергия — это название для вида энергии, обусловленной взаимным расположением тел или его частей и характером взаимодействия между ними. Речь может идти не только о потенциальной энергии тяготения, но, скажем, о потенциальной энергии сжатой пружины или потенциальной энергии электрического поля. В последнем случае производится работа против электрических сил, когда мы „поднимаем" заряд над другими зарядами и таким образом сообщаем ему запас энергии. Потенциальную энергию любого названия можно подсчитать как произведение соответствующей силы на расстояние.

Перейдем теперь к кинетической энергии. Каждый знает, что если маятник отвести в сторону от положения равновесия и отпустить то он начнет колебаться. В момент, когда его отпускают, маятник имеет максимум потенциальной энергии тяготения. Однако, когда он проходит через положение равновесия, энергия тяготения становится равной нулю. Несмотря на это, маятник снова взбирается вверх, совершая работу против силы тяжести. Выходит, теряя потенциальную энергию тяготения, маятник в то же время запасается другой формой энергии, которая и позволяет ему вновь подниматься вверх. Это — кинетическая энергия, равная половине произведения квадрата скорости на массу. В случае колеблющегося маятника происходит периодический переход потенциальной энергии в кинетическую и обратно.

Вообще, те обычные формулы для вычисления потенциальной энергии тяготения и кинетической энергии, о которых только что шла речь, являются формулами приближенными. Первая становится неправильной на больших высотах над Землей ввиду заметного уменьшения веса тела. Вторая — при больших скоростях, настолько больших, что скорость движения становится сопоставимой со скоростью света. Тут как будто налицо нарушение закона сохранения энергии: как можно утверждать, что энергия сохраняется, если подсчитывают ее заведомо неточно? На самом деле никакого нарушения нет. В обычных условиях формулы потенциальной и кинетической энергии точны. А для необычных существуют формулы более общего вида, тоже точные, в которые наши входят как частный случай.

Отметим потенциальную энергию упругого тела, или, коротко, упругую энергию. Возьмем для примера пружину. Растянув пружину, мы совершили какую-то работу. В таком состоянии пружина способна самостоятельно поднять груз, то есть совершить работу. Следовательно, растянутая пружина обладает энергией. Стоит ее отпустить, как пружина начнет колебаться, переходя от растяжения к сжатию и обратно. При этом всякий раз, как только достигается положение равновесия, упругая энергия превращается в кинетическую, а при дальнейшем движении — наоборот. Но вот колебания пружины заканчиваются: куда исчезла сообщенная ей энергия? Оказывается, перешла в другой вид энергии — тепло. Это можно обнаружить даже с помощью термометра, не говоря уже о более тонких методах.

Тепловая энергия — это кинетическая энергия атомов и молекул.

Как уже говорилось выше, есть и другие виды энергии.

Есть электрическая энергия. Она связана с притяжением и отталкиванием электрических зарядов.

Есть энергия магнитная — магниты способны притягивать к себе некоторые металлы и проводники с током.

Есть энергия излучения — энергия света, или, более точно, энергия колебаний электромагнитного поля.

Есть энергия химическая, высвобождающаяся в химических реакциях. Она состоит из энергии движения электронов внутри атомов (кинетическая часть) и из энергии притяжения электронов к протонам (электрическая часть).

Есть ядерная энергия, связанная с упаковкой частиц в ядре атома. Она не похожа на гравитационную, электрическую или химическую — это принципиально новая форма энергии. И хотя формула для ее подсчета имеется, мы все же очень мало знаем о ней.

Наконец, теория относительности вводит понятие энергии массы. Любой объект обладает энергией уже потому, что он существует. При аннигиляции (взаимном уничтожении) электрона и позитрона их массы исчезают, но появляется определенная порция энергии излучения, которую можно подсчитать по формуле Эйнштейна:

$$E = mc^2.$$

В своем развитии человечество широко применяет различные формы энергии, создавая чрезвычайно сложные машины и механизмы. Такое использование было бы невозможно без знания закона сохранения энергии. Закон сохранения энергии необходим при анализе множества явлений из самых разнообразных областей физики. Вот почему этому закону придается особо важное значение.

5. ВРАЩАТЕЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ

Требования программы

Равномерное движение по окружности. Линейная скорость. Угловая скорость. Центростремительная сила, точка ее приложения. Центростремительное ускорение. Формула центростремительного ускорения (без вывода). Технические примеры.

Равномерное движение тела по окружности является частным случаем более общего движения — криволинейного. Соответствующими опытами доказывается, что любое криволинейное движение совершается под действием силы, направленной под углом к направлению скорости. В самом деле, если бы никакая сила не действовала, то согласно первому закону Ньютона тело сохраняло бы состояние прямолинейного равномерного движения. Ясно, что движение тела по окружности будет происходить только в том случае, если его обеспечивает какая-то сила. При равномерном движении тела по окружности эта сила будет изменять только направление скорости, не влияя на ее величину. Эта сила будет всегда перпендикулярна к направлению скорости. По второму закону Ньютона там, где под действием силы происходит изменение скорости тела, всегда появляется ускорение. В данном случае это будет центростремительное ускорение, направленное по радиусу к центру окружности, с величиной v^2/R. Зная массу вращающегося тела, на основании второго закона Ньютона можно найти величину силы, заставляющей тело двигаться по окружности. Эта сила носит название центростремительной:

$$F_{ц.}=\frac{mv^2}{R}.$$

Центростремительная сила всегда приложена к телу и направлена по радиусу к центру окружности. Важно усвоить, что в качестве центростремительной силы может проявить себя любая сила, удерживающая тело на криволинейной траектории: сила трения, сила упругости, сила тяготения, электрическая и магнитная силы. Центростремительная сила может быть суммой нескольких сил, действующих на тело.

Согласно третьему закону Ньютона должна существовать, как ответная, другая сила, равная по величине центростремительной, противоположно направленная, но не уравновешивающая ее. Эта сила называется центробежной. Центробежная сила приложена к связям, например к веревке, на которой привязан камень, вращающийся по окружности.

При решении задач по данной теме рекомендуется следующий порядок действий:

1) найти все силы, действующие на тело;

2) найти проекцию этих сил на направление радиуса и подсчитать их сумму;

3) приравнять сумму всех проекций сил на направление радиуса к произведению массы на центростремительное ускорение.

Вопросы для самопроверки

1. Что такое криволинейное движение?
2. Какие виды простых криволинейных движений вы знаете?

3. Как направлена линейная скорость тела, вращающегося по окружности?

4. В чем заключается принцип независимости движений?

5. Что такое угловая скорость вращения?

6. В каких единицах измеряется угловая скорость?

7. Как связана угловая скорость с числом оборотов в секунду?

8. Что такое период обращения?

9. Как связана линейная скорость с угловой? С числом оборотов в секунду?

10. Чему равно центростремительное ускорение?

11. Чему равна центростремительная сила?

12. В каких направлениях действуют центростремительная и центробежная силы? К чему они приложены?

Задачи для закрепления

Задачник под редакцией П. А. Знаменского, номера: 448, 449, 450, 451, 453, 461, 462, 464, 469, 474, 476, 480, 482.

Примеры решения задач

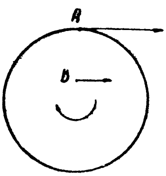


Рис. 23.

Задача 5.1. На рис. 23 изображено вращающееся колесо. Точка A, лежащая на ободе, имеет скорость 0,4 *м/сек*. Точка B, отстоящая от точки A на 0,15 *м*, имеет скорость 0,1 *м/сек*. Определить радиус колеса и угловую скорость.

Решение. Скорость точки A есть

$$v_A = \omega R.$$

Скорость точки B есть

$$v_B = \omega (R - 0{,}15).$$

Взяв отношение скоростей, получаем пропорцию

$$\frac{v_A}{v_B} = \frac{R}{R - 0{,}15},$$

из которой узнаем величину радиуса: $R=0{,}2$ *м*. Угловая скорость колеса

$$\omega=\frac{v_A}{R}=\frac{0{,}4\,\frac{м}{сек}}{0{,}2\ м}=2\,\frac{1}{сек}.$$

Задача 5.2. Автомобиль весом P движется с постоянной скоростью v. Какое давление будет производить машина, проезжая середину выпуклого моста? Вогнутого моста? Принять радиус кривизны моста равным R.

Решение. Прежде всего определим силы, действующие на автомобиль в вертикальном направлении: это будет вес P и сила реакции опоры N. Вес направлен вниз, сила реакции — вверх. Следовательно, если направление веса принять за положительное, силу реакции надо писать со знаком минус. Таким образом, сумма всех сил, действующих на автомобиль в вертикальном направлении, будет $P-N$.

Когда автомобиль едет по горизонтальной дороге, ускорений в направлении действия указанных сил нет, и тогда, по второму закону Ньютона, результирующая сила $P-N=0$, что дает $P=N$.

В присутствии ускорения, направленного вниз (в положительном направлении),

$$P-N=ma.$$

Если же ускорение направлено вверх (в отрицательном направлении), то

$$P-N=-ma.$$

В тот момент, когда автомобиль проезжает середину выпуклого моста, он испытывает в вертикальном направлении центростремительное ускорение v^2/R, направленное вниз. Следовательно, должно соблюдаться уравнение

$$P-N=m\frac{v^2}{R}. \tag{1.26}$$

Аналогично, в случае движения по вогнутому мосту, на автомобиль будет действовать центростремительное ускорение, направленное вверх, поэтому

$$P-N=-m\frac{v^2}{R}. \tag{1.27}$$

По третьему закону Ньютона сила давления автомобиля на мост равна силе реакции моста N. Из уравнения (1.26) находим силу давления автомобиля на выпуклый мост:

$$N = P - \frac{mv^2}{R}$$

(она меньше веса автомобиля).

А из уравнения (1.27) находим силу давления автомобиля на вогнутый мост:

$$N = P + \frac{mv^2}{R}$$

(она больше веса автомобиля).

Задача 5.3. Шарик массы m подвешен на нити длиной l. Его отклонили от положения равновесия до высоты точки подвеса и отпустили. При каком значении угла α нить оборвется, если известно, что нить выдерживает утроенный вес шарика?

Решение. Рассмотрим действие сил на шарик в момент, когда он находится в некоторой точке B (рис. 24). На шарик действует сила натяжения нити T и вес P. Проекция веса на направление радиуса будет

$$F = P\cos\alpha = mg\cos\alpha. \tag{1.28}$$

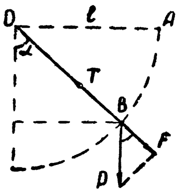


Рис. 24.

Результирующая сила, действующая на шарик в направлении радиуса, будет $T - F$. (Положительным считаем направление к центру.) Поскольку шарик движется по дуге окружности, он обладает центростремительным ускорением v^2/l, направленным к центру. По второму закону Ньютона результирующая сила должна быть равна массе шарика, умноженной на это ускорение:

$$T - F = \frac{mv^2}{l}.$$

Уравнение 1.29 есть уравнение движения шарика. Заменим в нем F по формуле (1.28) и введем условие обрыва нити, $T = 3mg$. Сокращая на m, получим

$$3g - g\cos\alpha = \frac{v^2}{l}. \tag{1.30}$$

Неизвестную нам скорость v найдем с помощью закона сохранения энергии: полная энергия шара в точке B равна его потенциальной энергии в точке A:

$$\frac{mv^2}{2} = mg(l-h) = mgl,$$

откуда, ввиду $h = l\cos\alpha$ $v^2 = 2gl\cos\alpha$.

Подставляя выражение квадрата скорости в уравнение (1.30) и решая его относительно $\cos\alpha$, находим:

$$\cos\alpha = 1, \quad \alpha = 0.$$

Нить разорвется, когда шарик окажется в самой нижней точке траектории.

Дополнительный материал

Искусственные спутники Земли

Когда искусственный спутник Земли движется по круговой орбите или близкой к ней, его можно рассматривать как тело, вращающееся по окружности вокруг центра Земли.

По законам вращательного движения любое тело, перемещающееся по окружности, испытывает центростремительное ускорение, определяемое формулой

$$a = \frac{v^2}{R}.$$

Спутник, следовательно, тоже должен иметь такое ускорение, направленное к центру нашей планеты. Это ускорение создается силой притяжения Земли. Неясно только, какова будет величина этого ускорения.

Чтобы выяснить величину ускорения, вспомним, что вес тела, с точки зрения закона всемирного тяготения, есть сила, с которой центр массы тела притягивается к центру Земли. Математически это выражается уравнением

$$mg = \gamma \frac{mM}{R^2}. \tag{1.31}$$

На высоте H вес тела будет меньше, чем у поверхности Земли, потому что сила притяжения ослабевает обратно пропорционально квадрату расстояния. Ускорение силы тяжести, следовательно, будет меньше g. Обозначим его через a. Предыдущее уравнение примет вид

$$ma = \gamma \frac{mM}{(R+H)^2}. \qquad (1.32)$$

Разделив уравнение (1.32) на уравнение (1.31), получим отношение ускорения свободного падения на высоте H к ускорению свободного падения у поверхности Земли:

$$\frac{a}{g} = \frac{R^2}{(R+H)^2},$$

откуда

$$a = \frac{R^2}{(R+H)} g. \qquad (1.33)$$

Из формулы (1.33) вытекает, что когда $H \ll R$,

$$\frac{R^2}{(R+H)^2} \simeq 1,$$

и можно с достаточной точностью принять $a = g$.

Теперь понятно, что спутник, вращающийся недалеко от поверхности Земли, можно рассматривать как тело, которое все время свободно падает с постоянным ускорением $a = g = 9{,}8$ *м/сек*^{2}. Такой подход позволяет легко вычислить его скорость и период обращения. Найдем в качестве примера скорость и период обращения первого советского искусственного спутника Земли. Расстояние от спутника до центра Земли $R \simeq 6500$ *км*, следовательно,

$$v = \sqrt{gR} = 8 \text{ км/сек}.$$

Эта скорость носит специальное название первой космической скорости.

Если теперь разделить длину орбиты L на скорость спутника, то получим время T одного оборота спутника. На небольшой высоте можно считать, что $L \simeq 40\,000$ *км*. Значит,

$$T = \frac{L}{v} \simeq 5000 \text{ сек} = 83 \text{ мин}.$$

Интересно заметить, что первые такие расчеты произвел Ньютон еще примерно в 1660 г. В качестве спутника он рассматривал ядро, выстреливаемое из пушки, помещенной на высокую гору.

Причина невесомости в кораблях-спутниках

Вопрос о невесомости уже частично обсуждался в разделе „Динамика“, в теме „Дополнительный материал. Вес и невесомость“. Там было показано, что на тело, движущееся вертикально вниз с ускорением a, действует помимо веса еще дополнительная сила

$$F_* = m(g - a).$$

Эта сила становится равной нулю (что и означает наступление состояния невесомости) как только a становится равным g. Но выше как раз говорилось о том, что движение спутника можно интерпретировать как беспрерывное падение с ускорением a, равным ускорению силы тяжести. Все, что находится в кабине спутника, тоже „падает“ с ускорением $a = g$, в результате чего предметы не имеют никакого ускорения относительно стен кабины. В этом и кроется причина невесомости в кораблях-спутниках. Если двигатели начнут разгонять или тормозить спутник, у всех предметов внутри кабины сразу появится ускорение относительно стен кабины. Они обретут „вес“, равный произведению их массы на это ускорение.

РАВНОПЕРЕМЕННОЕ ВРАЩАТЕЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ

Существует аналогия между прямолинейным и вращательным движениями.

Основные характеристики равнопеременного прямолинейного движения — это путь s, скорость v, ускорение a и время t; им соответствуют основные характеристики равнопеременного вращательного движения: угол поворота φ, угловая скорость ω, угловое ускорение ε и время t. Представление об аналогии между прямолинейным и вращательным движениями дает следующая таблица.

Прямолинейное движение	Вращательное движение
Путь s	Угол поворота φ
Скорость v	Угловая скорость ω
Ускорение a	Угловое ускорение ε
Время t	Время t
Путь в равномерном движении $s = vt$	Угол поворота при равномерном вращении $\varphi = \omega t$
Путь в равнопеременном движении $s = v_0 t + \frac{at^2}{2}$	Угол поворота при равнопеременном вращении $\varphi = \omega_0 t + \frac{\varepsilon t^3}{2}$
Скорость в равнопеременном движении $v = v_0 + at$	Угловая скорость при равнопеременном вращении $\omega = \omega_0 + \varepsilon t$
Разность квадратов скоростей $v^2 - v_0^2 = 2as.$	Разность квадратов угловых скоростей $\omega^2 - \omega_0^2 = 2\varepsilon\varphi.$

Пользуясь формулами равнопеременного вращательного движения, надо угол φ выражать в радианах. Соответственно в радианной мере должны выражаться и другие характеристики.

Для иллюстрации применения формул равнопеременного вращательного движения рассмотрим решение следующих двух задач.

Задача 5.4. Вал электромотора начинает вращаться из состояния покоя равноускоренно и за первые 5 *сек* делает 25 оборотов. Вычислить угловую скорость вала в конце пятой секунды.

Решение. Если вращающееся тело сделало один оборот вокруг оси, то угол поворота равен 2π радиан. Если тело сделало N оборотов, то угол поворота становится в N раз больше. Таким образом, $\varphi = 2\pi N$, где N — число оборотов.

В задаче сказано, что вал вращается равноускоренно, следовательно, для решения нужно применить формулы равноускоренного вращательного движения:

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

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

По условию $\omega_0 = 0$. Угловое ускорение, найденное из первой формулы, будет

$$\varepsilon = \frac{2\varphi}{t^2}.$$

Подставляя его во вторую формулу, получаем

$$\omega = \frac{2\varphi}{t} = \frac{4\pi N}{t}.$$

После подстановки чисел находим, что

$$\omega = 20\pi \frac{1}{сек}.$$

Задача 5.5. Пропеллер самолета делает 1200 *об/мин*. После выключения, совершив 80 оборотов, он останавливается. Сколько времени прошло с момента выключения мотора до остановки, если считать вращение равнозамедленным?

Решение. Угловая скорость находится по формуле $\omega = 2\pi N$, в которой N — число оборотов в секунду. Если N — число оборотов в минуту, то

$$\omega = \frac{2\pi N}{60} = \frac{\pi N}{30} \frac{1}{сек}.$$

Начальная угловая скорость

$$\omega_0 = 40\pi \frac{1}{сек}.$$

Конечная $\omega = 0$. Угловое ускорение

$$\varepsilon = -\frac{\omega_0}{t},$$

а

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

С другой стороны угол φ, очерченный лопастью пропеллера за 80 оборотов, равен $2\pi 80$ радиан. Следовательно,

$$2\pi 80 = \frac{40\pi}{2} t,$$

откуда

$$t = 8 \text{ сек.}$$

После выключения мотора пропеллер остановился через 8 *сек.*

6. НЕКОТОРЫЕ ЗАДАЧИ ПО РАЗДЕЛУ „МЕХАНИКА"

Задача 6.1. Тело, двигаясь с постоянным ускорением, проходит два одинаковые отрезка пути s по 10 *м* каждый. Найти ускорение тела a и скорость v_0 в начале первого отрезка, если первый отрезок пройден телом за время $t_1 = 0,6$ *сек*, а второй за $t_2 = 2,2$ *сек*.

Решение. Уравнение пути для первого тела

$$s = v_0 t_1 + \frac{at_1^2}{2}.$$

Для второго:

$$s = (v_0 + at_1)\,t_2 + \frac{at_2^2}{2},$$

где $(v_0 + at_1)$ — мгновенное значение начальной скорости на втором участке.

Решая относительно a и v_0, находим:

$$a = \frac{2s\,(t_1 - t_2)}{t_1 t_2 (t_1 + t_2)} = -3 \text{ м/сек}^2,$$

$$v_0 = \frac{s}{t_1} - \frac{at_1}{2} = 11,5 \text{ м/сек.}$$

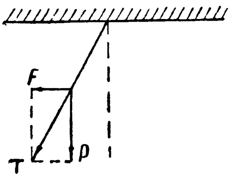


Рис. 25.

Задача 6.2. Вагон движется горизонтально с ускорением $a = 0,1$ *м/сек*^{2}. К потолку вагона подвешена нить с грузом массой $m = 100$ *г*. Определить натяжение нити и угол отклонения от вертикали.

Решение. При движении вагона с ускорением a, груз получает относительно вагона ускорение $-a$, в результате чего нить принимает наклонное положение (рис. 25). Натяжение ее, как легко видеть, будет:

$$T=\sqrt{F^2+P^2}=m\sqrt{a^2+g^2}\simeq 9{,}8\ н.$$

Угол наклона определится из прямоугольного треугольника:

$$\operatorname{tg}\alpha=\frac{F}{P}=\frac{a}{g}=0{,}01,$$

$$\alpha\approx 0{,}57.$$

Задача 6.3. Блок с двумя движущимися грузами подвешен к коромыслу весов и уравновешен гирей в 20 *н* (рис. 26). Зная, что вес правого груза $P_1=8$ *н*; определить вес левого груза P_2. Массой блока пренебречь.

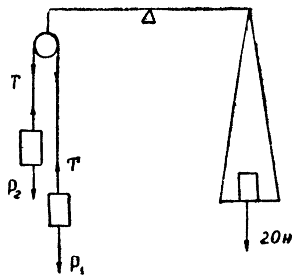


Рис. 26.

Сохранится ли равновесие весов при неподвижных грузах P_1 и P_2?

Решение. Гиря в 20 *н* уравновешивает натяжение двух нитей (но не вес грузов!). Поэтому из условия

$$2T=20\ н$$

находим величину натяжения: $T=10$ *н*.

Составим уравнения движения каждого груза

$$P_2-T=\frac{P_2}{g}a,$$

$$T-P_1=\frac{P_1}{g}a$$

и разделим первое на второе. После небольшого преобразования найдем, что

$$P_2=\frac{P_1T}{2P_1-T}\simeq 13\ н.$$

Сумма $P_1+P_2=21$ *н*, значит, при неподвижных грузах равновесие не сохранится.

Задача 6.4. Лестница длиной $2l$ и весом P опирается на вертикальную стену и горизонтальный пол.

Коэффициент трения между стеной и лестницей равен 0,4, между полом и лестницей — 0,5. Определить наименьший угол наклона лестницы, при котором она может оставаться в равновесии.

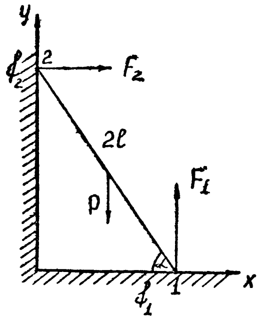


Рис. 27.

Решение. Действующие на лестницу силы показаны на рис. 27. Лестница будет в равновесии, если будут равны нулю:

1) сумма проекций всех сил на ось x

$$F_2 - f_1 = 0,$$

2) сумма проекций всех сил на ось y

$$F_1 + f_2 - P = 0.$$

Кроме того, если лестница находится в равновесии, то алгебраическая сумма моментов, взятых относительно любой точки, тоже должна быть равна нулю. Поэтому относительно точки 1 имеем:

$$Pl\cos\alpha - F_2\cdot 2l\sin\alpha - f_2\cdot 2l\cos\alpha = 0,$$

где α — наименьший искомый угол наклона лестницы, при меньшем она начинает скользить. Замечая, что

$$f_1 = k_1F_1 \quad \text{и} \quad f_2 = k_2F_2,$$

получим:

$$F_2 = k_1F_1,$$

$$F_1 = P - k_2F_2,$$

$$2\sin\alpha\cdot F_2 + 2k_2F_2\cos\alpha = P\cos\alpha.$$

Решая систему уравнений, находим:

$$F_2 = \frac{k_1}{1 + k_1k_2}P,$$

$$F_1 = \frac{1}{1 + k_1k_2}P$$

или

$$2\sin\alpha\frac{k_1}{1 + k_1k_2}P + 2\cos\alpha\frac{k_1}{1 + k_1k_2}P = P\cos\alpha,$$

откуда

$$\operatorname{tg}\alpha=\frac{1-k_1k_2}{2k_1}=\frac{1-0,4\cdot 0,5}{2\cdot 0,4}=1,$$

$$\alpha=45^\circ.$$

Задача 6.5. Два диска, расположенные на одной оси, приводятся в быстрое вращение с постоянной угловой скоростью. Частота вращения 100 *об/сек*. Пуля пробивает сначала первый диск, потом второй. Определить скорость пули, если пробоина во втором диске сдвинута относительно пробоины в первом диске на 36°, а расстояние между дисками равно 0,45 *м*.

Решение. Угловая скорость вращения диска есть

$$\omega=\frac{\varphi}{t},$$

где φ — угол, на который поворачивается радиус диска за время t. Пока пуля летела от первого диска ко второму, тот успел повернуться на $\varphi=36^\circ=0,2\pi$ радиан. Следовательно,

$$\omega=\frac{0,2\pi}{t}.$$

С другой стороны, $\omega=2\pi n$, так что

$$t=\frac{0,2\pi}{2\pi n}=0,001\ \textit{сек}.$$

Скорость пули находится делением расстояния между дисками на это время:

$$v=\frac{L}{t}=\frac{2\pi nL}{0,2\pi}=450\ \textit{м/сек}.$$

Задача 6.6. На какую высоту следует запустить искусственный спутник Земли, чтобы он все время находился над одним и тем же пунктом Земли?

Решение. Чтобы спутник находился над одним и тем же местом Земли, необходимо, чтобы период вращения Земли в точности равнялся периоду обращения спутника. При этом центростремительной силой, заставляющей спутник двигаться по круговой орбите, будет его вес на той высоте h над Землей, на которой он находится. Значит,

$$P_h=\frac{mv^2}{R+h}$$

или

$$\gamma \frac{mM}{(R+h)^2} = \frac{mv^2}{R+h}$$

(M — масса, а R — радиус Земли). Учитывая, что

$$v = \frac{2\pi(R+h)}{T},$$

где T — период обращения, имеем:

$$h = \sqrt[3]{\gamma M \left(\frac{T}{2\pi}\right)^2} - R.$$

Задача 6.7. Диаметр одного из астероидов $2R_A = 5$ *км*. Приняв плотность астероида $\rho = 5{,}5$ *г/см*^{3}, найти ускорение силы тяжести на его поверхности. Вычислить, на какую высоту поднялся бы человек, подпрыгнувший с астероида, если на Земле с тем же усилием он подпрыгнул бы на 0,5 *м*.

Решение. По закону всемирного тяготения

$$F = \gamma \frac{mM_A}{R_A^2},$$

на основании чего

$$g_A = \frac{F}{m} = \gamma \frac{M_A}{R_A^2}.$$

M_A, R_A, g_A — соответственно масса, радиус и ускорение силы тяжести астероида. Замечая, что

$$M_A = \rho_A V_A = \frac{4}{3}\pi R_A^3 \rho_A,$$

получим:

$$g_A = \frac{4}{3}\gamma\pi R_A \rho_A \approx 0{,}0076 \text{ м/сек}^2.$$

Для определения высоты прыжка воспользуемся законом сохранения энергии:

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

или

$$v^2 = 2gh.$$

Усилие прыжка, по условию задачи, одно и то же для Земли и астероида, то есть начальные скорости одинаковы. Для Земли

$$v^2 = 2g_з h_з,$$

для астероида

$$v^2 = 2g_A h_A,$$

следовательно,

$$2g_з h_з = 2g_A h_A,$$

откуда

$$h_A = \frac{g_з h_з}{g_A} \simeq 750 \text{ м.}$$

Задача 6.8. Из винтовки в горизонтальном направлении сделано два выстрела в щит, который находится на расстоянии 50 *м*. После первого выстрела перед дулом поставили дубовую доску. Вторая пуля, пробив доску, попала в щит на 1,36 *см* ниже первой. Какая работа была затрачена на пробивание доски, если начальная скорость пули 350 *м/сек*, а вес пули 5 *г*?

Решение. На рис. 28 показаны траектории пуль. В первом выстреле пуля за время полета опустится на величину

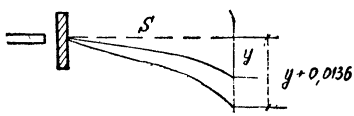


Рис. 26.

$$y = \frac{gt_1^2}{2},$$

во втором выстреле на $y + 0{,}0136 = \frac{gt_2^2}{2}$. Искомая работа A равна разности кинетических энергий до и после пробивания доски:

$$A = \frac{mv_1^2}{2} - \frac{mv_2^2}{2}, \qquad (1.34)$$

где $v_1 = s/t_1$, $v_2 = s/t_2$. Из рис. 28 видно, что

$$\frac{gt_1^2}{2} + 0{,}0136 = \frac{gt_2^2}{2},$$

или, по-другому,

$$\frac{gt_2^2}{2} = \frac{g\left(\frac{s}{v_1}\right)^2}{2} + 0{,}0136,$$

откуда найдем t_2^2:

$$t_2^2 = \frac{2}{g}\left[\frac{g}{2}\left(\frac{s}{v_1}\right)^2 + 0{,}0136\right].$$

Квадрат скорости v_2^2 будет:

$$v_2^2 = \frac{s^2}{t_1^2} = \frac{gs^2}{2\left[\frac{1}{2}g\left(\frac{s}{v_1}\right)^2 + 0{,}0136\right]}.$$

Подставляя v_2^2 в формулу работы (1.34), находим:

$$A = \frac{mv_1^2}{2} - \frac{mgs^2}{4\left[\frac{1}{2}g\left(\frac{s}{v_1}\right)^2 + 0{,}0136\right]}.$$

В численном виде

$$A \simeq 266{,}7 \text{ дж}.$$

II. КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ, ЗВУК

1. КОЛЕБАТЕЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ

Требования программы

Примеры колебательных движений. Гармоническое колебание. Период и частота колебаний. Амплитуда колебаний. Связь между периодом и частотой. Формула периода колебаний маятника (без вывода ее). Явления механического резонанса. Поперечные и продольные волны. Скорость распространения колебаний. Длина волны. Зависимость между длиной волны, скоростью распространения колебаний и частотой или периодом.

При прохождении данного раздела надо обратить внимание на определение колебательного движения, частоты, периода, амплитуды и фазы колебаний. Фазу колебания нужно уметь писать в различном виде: φ, ωt, $\frac{2\pi}{T}t$, $2\pi f t$, и знать, как меняется колебательный процесс от величины начальной фазы.

Необходимо помнить, что формула периода колебаний маятника

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$$

верна, во-первых, только для математического маятника, а во-вторых, только при малых углах отклонения нити маятника от положения равновесия.

Понятие резонанса играет важную роль там, где имеют дело с колебательными процессами. Поэтому следует хорошо уяснить его сущность и самостоятельно подобрать примеры полезного использования механического резонанса и вредных последствий его.

Процесс распространения колебаний называется волновым процессом. В зависимости от свойств среды волны могут быть продольными и поперечными. При продольной волне направление колебаний частиц среды, в которой происходит процесс распространения колебаний, совпадает с направлением распространения волны. При поперечной волне направление колебаний частиц среды перпендикулярно направлению распространения волны. В газах и жидкостях распространяются только продольные волны. На границе раздела жидкость — воздух, в струнах, шнурах, канатах распространяются только поперечные волны. Связь между скоростью волны v, длиной волны λ и периодом T или частотой колебаний f определяется уравнением

$$v = \frac{\lambda}{T} = \lambda f,$$

которое по-другому называется основной формулой волны.

Вопросы для самопроверки

1. Дайте определение периодического движения.
2. Какие механические колебания называются гармоническими?
3. Дайте определение периода, частоты и амплитуды колебания.
4. Что называется математическим маятником?
5. По какой формуле рассчитывают период колебания математического маятника?
6. Что такое фаза колебания, начальная фаза, сдвиг фаз?
7. Начертить две синусоиды со сдвигом фаз, равным 180°.
8. Как записать закон сохранения энергии для маятника?
9. Как графически складываются два или несколько гармонических колебаний?
10. Почему колебания шарика на нити являются затухающими?
11. Объясните, что такое вынужденные колебания. Приведите примеры.
12. Что такое резонанс? Приведите примеры.

13. Что называют волновым движением или волной?

14. Как определяют длину волны?

15. Чем отличаются продольные волны от поперечных?

16. Напишите формулу волны.

Задачи для закрепления

Задачник под редакцией П. А. Знаменского, номера: 497, 498, 499, 504, 506, 508, 511, 523, 525, 527, 531, 532.

Примеры решения задач

Задача 1.1. Два маятника одновременно начинают колебаться. За одно и то же время первый совершает 15 колебаний, а второй только 10 колебаний. Определить отношение длин этих маятников.

Решение. Первый маятник за время t сделает

$$N_1 = \frac{t}{T_1} \text{ колебаний.}$$

Второй за это же время сделает

$$N_2 = \frac{t}{T_2} \text{ колебаний.}$$

Их периоды соответственно будут

$$T_1 = 2\pi\sqrt{\frac{l_1}{g}}, \quad T_2 = 2\pi\sqrt{\frac{l_2}{g}}.$$

Взяв отношение чисел колебаний и заменяя T_1 и T_2 их значениями, получаем:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{T_2}{T_1} = \sqrt{\frac{l_2}{l_1}}$$

или

$$\frac{l_2}{l_1} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 = \frac{9}{4}.$$

Второй маятник в 2,25 раза длиннее первого.

2. ЗВУК

Требования программы

Колебание звучащего тела. Волны в воздухе. Высота звука. Скорость звука. Отражение звука. Акустический резонанс.

Звук — это упругие волны очень слабых сжатий и разрежений, распространяющихся в воздухе со скоростью 340 *м/сек*. Звук играет чрезвычайно важную роль в жизни людей, отсюда необходимость знать свойства звуковых волн. Необходимо усвоить основные понятия, относящиеся к звуку: физическая природа звука, высота, громкость, скорость распространения в различных веществах и отражение звука.

Если заключенный в полости (в трубе) воздух начинает колебаться под действием падающих на него звуковых волн, то наступает явление акустического резонанса. Полезно сопоставить это явление с механическим резонансом.

В последние десятилетия большое развитие получила электроакустика, занимающаяся проблемами записи и воспроизведения звука.

Вопросы для самопроверки

1. Каким образом от колеблющегося тела распространяется звук?
2. Почему звук не может распространяться в безвоздушном пространстве?
3. Почему в воде или в стекле скорость звука больше, чем в воздухе?
4. Чем характеризуется звук?
5. Почему сила звука и громкость звука понятия неравнозначные?
6. В чем заключается явление акустического резонанса?
7. Назовите приборы, предназначенные для записи и воспроизведения звука.

Задачи для закрепления

Задачник под редакцией П. А. Знаменского, номера: 515, 517, 528, 533, 534.

III. ЖИДКОСТИ И ГАЗЫ

1. ГИДРОСТАТИКА

Требования программы

Давление. Закон Паскаля для жидкости и газов. Принцип устройства гидравлического пресса. Давление жидкости на дно и на стенки сосуда. Закон сообщающихся сосудов для однородных и неоднородных жидкостей.

Давление атмосферы. Опыт Торичелли. Величина нормального атмосферного давления. Единицы давления: ньютон на квадратный метр, дина на квадратный сантиметр, физическая атмосфера, техническая атмосфера, миллиметр ртутного столба. Ртутный и металлический барометры.

Закон Архимеда для жидкостей и газов. Условия плавания тел.

Для характеристики свойств жидкостей и газов пользуются физической величиной, которая называется давлением. Давление p численно равно силе, действующей на единицу площади, перпендикулярной силе:

$$p = \frac{F}{S}.$$

Единицей измерения давления в системе СИ будет ньютон на *м*^{2}, в системе СГС — дина на *см*^{2} (*бар*). В технике употребительна внесистемная единица: *кГ* на *см*^{2} (техническая атмосфера). Эту последнюю единицу давления не следует путать с физической атмосферой, равной 760 *мм рт. ст.* Связь между единицами измерения давления следующая:

$$1\ н/м^2 = 10\ бар,$$

$$1\ \text{кГ/см}^2 = 9{,}8\cdot10^4\ \text{н/м}^2 = 9{,}8\cdot10^5\ \text{бар},$$
$$1\ \text{мм рт. ст.} = 1{,}36\cdot10^{-3}\ \text{кГ/см}^2 = 1333\ \text{бар}.$$

Силы давления в жидкостях или газах возникают при изменении их объема и сжатии внешними силами. Это — силы упругости сжатых жидкостей или газов. Силы давления со стороны покоящейся жидкости или газа всегда перпендикулярны поверхности, на которую они действуют, и распределены по всей поверхности.

Гидростатическое давление внутри жидкости или газа зависит от степени сжатия на данной глубине. На глубине h в жидкости с плотностью ρ чисто гидростатическое давление будет

$$p_2 = \rho g h,$$

где g — ускорение силы тяжести. Обычно на поверхности жидкости давление равно атмосферному p_a, поэтому для давления на глубине h имеем следующую формулу:

$$p = p_a + \rho g h.$$

Жидкости и газы подчиняются закону Паскаля, согласно которому давление, производимое на жидкость или газ, заключенные в замкнутом сосуде, передается ими равномерно во все стороны перпендикулярно стенкам сосуда. В случае, когда сила давления в замкнутом сосуде намного больше веса жидкости или газа, пренебрегая весом, можно сказать, что давление в любой точке жидкости или газа в сосуде одинаково. Нужно обратить внимание на то, что в законе Паскаля речь идет не о давлении вообще, а о давлении, создаваемом посторонними (поверхностными) силами.

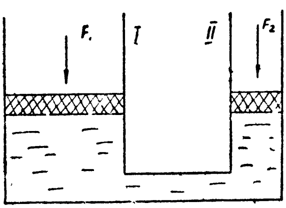


Рис. 29.

Закон Паскаля лежит в основе принципа действия гидравлического пресса.

Гидравлический пресс может быть представлен схематически так, как это изображено в разрезе на рисунке 29.

Так как давление жидкости в первом и во втором колене равно (по закону Паскаля), то при условии равновесия мы можем записать:

$$F_1 = S_1 p, \quad F_2 = S_2 p, \quad \frac{F_1}{S_1} = \frac{F_2}{S_2}, \quad F_1 = F_2 \frac{S_1}{S_2}.$$

S_1 и S_2 — площадь поперечного сечения I и II колен. Действуя на поршень с меньшим сечением с силой F_2, мы можем уравновесить силу F_1, действующую на поршень с большим сечением. Сила F_1 во столько раз больше силы F_2, во сколько площадь S_1 больше площади S_2.

Задачи на сообщающиеся сосуды решаются также на основе закона Паскаля, который для сообщающихся сосудов может быть сформулирован так: давление на одном уровне в сообщающихся сосудах одинаково.

Твердое тело, будучи помещено в жидкость, испытывает давление со стороны жидкости. Вследствие этого на тело действует выталкивающая сила, направленная вверх, приложенная к центру тяжести тела и по величине равная весу жидкости в объеме погруженной части тела (закон Архимеда). Выталкивающую силу называют еще архимедовой силой. Обозначим ее F_A. Согласно определению,

$$F_A = \rho g V_*,$$

где ρ имеет смысл плотности жидкости (газа), а V_* — объем погруженной части тела.

Пусть P — вес тела. Если

$$P > F_A,$$

то тело тонет. При

$$P = F_A$$

тело находится в равновесии, а при

$$P < F_A$$

тело всплывает до тех пор, пока вес жидкости, вытесненной погруженной частью тела, не станет равен весу тела.

Вопросы для самопроверки

1. Что такое давление? Что такое сила давления?
2. Как вывести соотношения между единицами давления?

3. Как жидкости и газы передают производимое на них давление?

4. На основании каких явлений можно заключить о существовании атмосферного давления?

5. Какой способ измерения атмосферного давления вам известен?

6. Каково устройство известных вам приборов для измерения давления?

7. В чем состоит закон Архимеда?

8. Каково условие плавания тел на поверхности жидкости?

Задачи для закрепления

Задачник под редакцией П. А. Знаменского, номера: 360, 367, 364, 368, 370, 374, 375, 376, 377, 388, 393, 395, 399, 400, 406, 411, 417.

Примеры решения задач

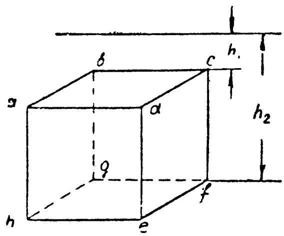


Рис. 30.

Задача 1.1. Найти сумму всех действующих со стороны жидкости сил на погруженный прямоугольный параллелепипед (рис. 30).

Решение. Сумма всех сил, действующих со стороны жидкости на сторону $abgh$, равна сумме всех сил, действующих на сторону $dcfe$. Эти силы противоположны по направлению и равны по величине, поэтому их сумма равна нулю. То же самое справедливо для стороны $adeh$ и $bcfg$. Сумма всех сил, действующих на сторону $abcd$, будет равна

$$F_1 = p_1 S,$$

где p_1 — давление на глубине h_1, а S — площадь стороны $abcd$. Сумма всех сил, действующих на сторону $fghe$, будет равна

$$F_2 = p_2 S.$$

Результирующая всех сил будет равна

$$F = F_2 - F_1 = S(p_2 - p_1).$$

Статическое давление возрастает с глубиной по закону

$$p = \rho g h,$$

с учетом чего запишем:

$$p_1 = \rho g h_1, \quad p_2 = \rho g h_2,$$

$$F = S(\rho g h_2 - \rho g h_1) = \\ = \rho g S(h_2 - h_1) = \rho g V,$$

где V — объем параллелепипеда.

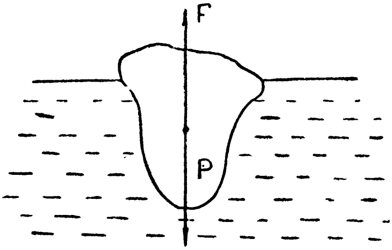


Рис. 31.

Задача 1.2. Рассчитать, какая часть объема айсберга выступает над поверхностью воды, если плотность льда 0,9 *г/см*^{3}.

Решение. Обозначим объем айсберга через V. Пусть из этого объема V_1 приходится на его надводную часть. Тогда под водой находится объем $V - V_1$.

Поскольку айсберг плавает, то, очевидно, архимедова сила

$$F_A = (V - V_1)\rho_в g$$

как раз равна весу ледяной горы, т. е.

$$(V - V_1)\rho_в g = V\rho_л g.$$

Из этого условия найдем отношение объема надводной части ко всему объему:

$$\frac{V_1}{V} = \frac{\rho_в - \rho_л}{\rho_в}.$$

Полагая плотность воды 1 *г/см*^{3}, окончательно получаем:

$$V_1 \approx 0{,}1V.$$

Задача 1.3. Алюминиевый шарик весит в воздухе 52 *г*, в воде 32 *г*, в бензине 38 *г*, в растворе медного купороса 29 *г*. Определить плотность бензина и раствора медного купороса.

Решение. На рис. 32 показана схема взвешивания погруженного в жидкость шарика. Из схемы видно, что, например, в воде на шарик действуют:

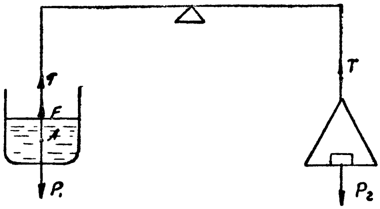


Рис. 32.

вес $P_1 = 52$ *г*,

натяжение нити $T = P_2$,

архимедова сила

$$F_A = \rho_в g V.$$

В момент равновесия справедливо уравнение

$$P_1 = P_2 + \rho_в g V. \qquad (3.1)$$

Аналогичные уравнения получаются для бензина:

$$P_1 = P_3 + \rho_б g V \qquad (3.2)$$

и для раствора медного купороса:

$$P_1 = P_4 + \rho_р g V. \qquad (3.3)$$

Из уравнения (3.1) находим V:

$$V = \frac{P_1 - P_2}{\rho_в g}.$$

Подставляя вместо V его значения в уравнение (3.2) и (3.3), получаем:

$$\rho_б = \frac{P_1 - P_3}{P_1 - P_2} \rho_в,$$

$$\rho_р = \frac{P_1 - P_4}{P_1 - P_2} \rho_в.$$

Плотность бензина $\rho_б = 0{,}7$ *г/см*^{3}, плотность раствора медного купороса $\rho_р = 1{,}15$ *г/см*^{3}.

Дополнительный материал

Задача 1.4. Два одинаковых сосуда с водой уравновешены на весах. Сосуды соединены гибкой трубкой (рис. 33). В левый сосуд опущен деревянный кубик. Как изменится равновесие?

Решение. Погружаясь, кубик поднимал уровень воды в левом сосуде, но поскольку сосуды сделаны сообщающимися, уровень поднимался также и в правом сосуде. Следовательно, равновесие весов не может нарушиться по причине неодинаковых уровней. Но, может быть, будет влиять присутствие кубика? Оказывается, нет. Кубик плавает, значит, его вес в точности равен весу вытесненной воды. Полный вес в левом сосуде не изменится, если забрать кубик и образовавшуюся „впадину" залить водой.

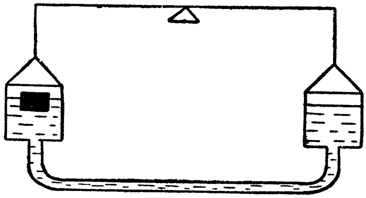


Рис. 33.

Весы, следовательно, будут находиться в равновесии.

2. ГИДРОДИНАМИКА

Все летательные аппараты, с физическими основами полета которых знакомятся в школьном курсе физики, можно разбить на три группы. Первая — воздушные шары, аэростаты, дирижабли, подъемная сила которых определяется законом Архимеда. Вторая — самолеты, вертолеты, подъем которых происходит вследствие разности гидродинамических давлений на нижней и верхней поверхности крыла или винта. Третья — ракеты, физической основой движения которых является третий закон Ньютона.

По этой теме полезно знать краткую биографию Н. Е. Жуковского и К. Э. Циолковского, а также быть в курсе последних достижений авиационной и ракетной техники Советского Союза.

Вопросы для самопроверки

1. Какое движение жидкости или газа называется стационарным?

2. Какова зависимость скорости течения жидкости от площади трубы?

3. Почему давление в покоящейся и в движущейся жидкости неодинаково?

4. Почему статическое давление в движущейся жидкости может стать меньше атмосферного?

5. Какова причина возникновения подъемной силы крыла самолета?

Задачи для закрепления

Задачник под редакцией П. А. Знаменского, номера: 429, 430, 432.

Дополнительный материал

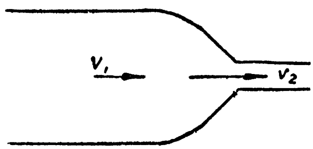


Рис. 34.

Давление в движущейся жидкости не равно давлению в неподвижной. Соответствующие опыты показывают, что оно зависит от скорости движения жидкости и может стать даже меньше атмосферного.

Рассмотрим стационарный (неизменный во времени) поток жидкости, протекающей из широкой трубы в узкую, как показано на рис. 34. Количество жидкости, проходящее в 1 *сек* через любое сечение, одинаково. Из этого следует равенство

$$S_1v_1 = S_2v_2,$$

которое можно переписать в виде

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{S_1}{S_2}.$$

Из последнего соотношения видно, что скорость в узкой трубке больше, чем в широкой.

Для движущейся жидкости различают два давления: статическое и динамическое. Статическое нам уже знакомо. Динамическое же подсчитывается по формуле

$$p_{\text{дин}} = \frac{\rho v^2}{2}, \qquad (3.4)$$

где ρ — по-прежнему обозначает плотность жидкости, а v — ее скорость в данном месте. Как видно из формулы (3.4), динамическое давление существует только тогда, когда $v \neq 0$, и оно тем больше, чем больше скорость. Общее давление в данном месте потока равно сумме статического и динамического давлений. Для горизонтально движущегося стационарного потока жидкости эта сумма остается постоянной (закон Бернулли):

$$p + p_{\text{дин}} = \text{const}. \tag{3.5}$$

Будучи написан для трубы переменного сечения, наподобие изображенной на рис. 29, закон Бернулли принимает вид:

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

Закон Бернулли справедлив также и для газов, если они движутся со скоростями, много меньшими скорости звука.

Из закона Бернулли в форме (3.5) следует, что статическое давление зависит от динамического:

$$p = \text{const} - p_{\text{дин}}.$$

Крыло самолета устроено так, что скорость потока, обтекающего его сверху, больше, чем скорость потока, обтекающего крыло снизу. Следовательно, над крылом статическое давление меньше такового под крылом. Это и является причиной возникновения подъемной силы крыла самолета.

Задача 2.1. На какую высоту поднимается вода через боковую трубку (рис. 35), впаянную в узкую часть горизонтальной водопроводной трубы диаметром 2 *см*, если в широкой части трубы диаметром 6 *см* скорость воды 0,3 *м/сек*, а давление 1 *атм*?

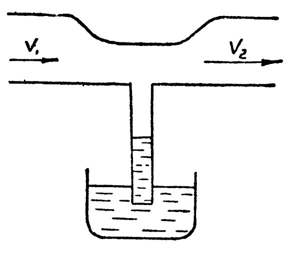


Рис. 35.

Решение. Вода по трубке поднимется на такую высоту h, чтобы вес столбика воды уравновесил разность статических давлений: атмосферного и действующего в узкой части трубы. Иными словами,

$$\rho g h = p_{\text{атм}} - p_2, \tag{3.6}$$

где p_2 — статическое давление в сужении.

Обозначим через p_1 статическое давление в широкой части трубы и напишем уравнение Бернулли:

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

Из уравнения Бернулли найдем p_2:

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

и подставим в условие (3.6).

При этом учтем, что по условию задачи статическое давление в широкой части трубы равно 1 *атм*, т. е. равно давлению $p_{атм}$. Значит,

$$\rho g h = p_{атм} - p_1 + \frac{\rho v_2^2}{2} - \frac{\rho v_1^2}{2} = \frac{\rho}{2}(v_2^2 - v_1^2),$$

откуда

$$h = \frac{1}{2g}(v_2^2 - v_1^2). \qquad (3.7)$$

Но скорость v_2 неизвестна. Чтобы ее найти, воспользуемся формулой

$$S_1 v_1 = S_2 v_2.$$

Из этой формулы, выражая площади сечений через диаметры, получим

$$v_2 = \frac{\frac{\pi d_1^2}{4}}{\frac{\pi d_2^2}{4}} v_1 = \frac{d_1^2}{d_2^2} v_1.$$

Следовательно, выражение (3.7) можно преобразовать к виду

$$h = \frac{v_1^2}{2g}\left(\frac{d_1^4}{d_2^4} - 1\right).$$

Принимая $g \approx 10$ *м/сек*^{2}, после вычислений получим:

$$h = 0{,}36 \text{ м}.$$

IV. ОСНОВЫ МОЛЕКУЛЯРНО КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ СТРОЕНИЯ ВЕЩЕСТВА

Требования программы

Основные положения молекулярно-кинетической теории, ее опытные обоснования. Броуновское движение. Диффузия в газах, жидкостях, твердых телах. Движение молекул газов, жидкостей и твердых тел. Взаимодействие молекул.

При изучении этого раздела следует обратить внимание на опытные обоснования основных положений молекулярно-кинетической теории.

Молекулы газов и жидкостей более подвижны, чем молекулы твердых тел. Этим обусловлена разница скоростей диффузии в соответствующих агрегатных состояниях. Практически можно считать, что в твердом кристаллическом теле атомы только колеблются. В жидкостях и аморфных телах (варе, воске) частицы колеблются и участвуют в поступательных движениях. В газах молекулы движутся поступательно и одновременно с этим вращаются.

Вопросы для самопроверки

1. Какими опытами доказывается, что молекулы ничтожно малы?

2. Какие опыты и явления доказывают наличие междумолекулярных пространств? Действие притяжения и отталкивания?

3. Чем объясняется, что с возрастанием размеров броуновской частицы ее движение становится медленнее?

4. Почему диффузия жидкостей происходит значительно медленнее, чем диффузия газов?

5. Как объяснить давление газа по молекулярно-кинетической теории?

6. Почему в горячей воде сахар растворяется быстрее, чем в холодной?

Задачи для закрепления

Задачник под редакцией П. А. Знаменского, номера: 611, 612, 613, 614, 615, 616, 617, 618, 619.

Дополнительный материал

Молекулы твердых тел и жидкостей находятся в довольно тесном контакте друг с другом. Именно поэтому твердые тела и жидкости такие плотные и почти несжимаемые. Плотность газов примерно в 100 раз меньше, соответственно велики средние расстояния между их молекулами. Прежде чем столкнуться, молекула газа пролетает расстояние во много раз больше ее диаметра.

Плотность одного из самых тяжелых элементов на Земле, платины, равна 21,4 *г/см*³. Плотность вещества в центре Солнца примерно 100 *г/см*³. В звездах, называемых белыми карликами, плотность доходит до нескольких тонн на *см*³.

Плотность воздуха 0,0013 *г/см*³. Плотность межзвездной среды (и она имеет плотность!) 10^{-24} *г/см*³. По сравнению с ней наилучший искусственный вакуум, имеющий плотность 10^{-19} *г/см*³, в 100 тысяч раз „тяжелее“!

Оказывается, концентрация вещества в мире весьма неравномерна!

V. ТЕПЛОТА

1. ТЕПЛОВОЕ РАСШИРЕНИЕ ТЕЛ И СВОЙСТВА ГАЗОВ

Требования программы

Коэффициенты линейного и объемного расширения. Особенности расширения воды. Расширение газов. Законы Бойля — Мариотта, Гей-Люссака, Шарля. Графики этих законов. Понятие об абсолютном нуле. Абсолютная температурная шкала. Объединенный закон Бойля — Мариотта — Гей-Люссака.

При нагревании твердых тел происходит изменение их объема. Соответственно меняется величина поверхности и линейные размеры. Это важное свойство характеризуется коэффициентами расширения:

линейным

$$\beta = \frac{l_t - l_0}{l_0 t} \qquad (5.1)$$

и объемным

$$\alpha = \frac{V_t - V_0}{V_0 t}, \qquad (5.2)$$

причем α и β связаны между собой соотношением

$$\alpha = 3\beta. \qquad (5.3)$$

Полезно обратить внимание на то, что математическая структура формул (5.1) и (5.2) одинакова. Дальше, в разделе „Электричество“, будет сказано о зависимости электрического сопротивления проводника от температуры. Упомянутая зависимость выражается формулой вида, аналогичного формулам (5.1) и (5.2):

$$\alpha_1 = \frac{R_t - R_0}{R_0 t}.$$

Заметим, что формула (5.2) годится и для расчета объемного расширения жидкостей.

Газовые законы, изучаемые в этом разделе, строго говоря, справедливы лишь для идеального газа. Идеальный газ — это такой газ, для которого можно пренебречь собственным объемом молекул по сравнению с объемом, занимаемым газом, и силами взаимодействия между молекулами. Последнее означает, что в таком газе нет внутреннего трения; он лишен вязкости и теплопроводности. Реальные газы при не очень больших давлениях и при не очень низких температурах близки по своим свойствам к идеальным газам.

Рассмотрим газовые законы. Состояние данного газа определяют четыре физические величины: давление p, объем V, температура t и масса m.

На опыте различными учеными были установлены следующие соотношения между этими величинами.

1. Когда $m = \text{const}$ и $t = \text{const}$, то

$$pV = \text{const} \text{ или } p_1 V_1 = p_2 V_2.$$

Это — закон Бойля — Мариотта. Соответствующий ему процесс называется изотермическим.

2. При $m = \text{const}$ и $p = \text{const}$

$$V_t = V_0(1 + \alpha t),$$

где V_t — объем газа при температуре $t°$ С, V_0 — объем при 0° С, $\alpha = \frac{1}{273} \frac{1}{град}$.

Этот закон носит название закона Гей-Люссака, а соответствующий ему процесс называется изобарическим.

3. Если $m = \text{const}$ и $V = \text{const}$, то

$$p_t = p_0(1 + \gamma t),$$

где p_t — давление газа при температуре $t°$ С, p_0 — давление при 0° С, $\gamma = \frac{1}{273} \frac{1}{град}$. Это — закон Шарля.

Соответствующий ему процесс называется изохорическим.

Пользуясь понятием абсолютной температуры T, можно получить объединенный закон газового состояния. В учебнике вывод этого закона дан достаточно хорошо. Заметим только, что поскольку объединенный закон газового состояния выводится на основе законов Бойля — Мариотта и Гей-Люссака, он справедлив только в том случае, когда масса газа остается постоянной при всех превращениях.

Объединенный закон газового состояния записывается в виде

$$\frac{p_1V_1}{T_1} = \frac{p_2V_2}{T_2} \tag{5.4}$$

или в виде

$$\frac{pV}{T} = \text{const}. \tag{5.5}$$

Если взять одну грамм-молекулу газа, то для этого количества константа будет иметь вполне определенное значение:

$$\frac{pV_0}{T} = R. \tag{5.6}$$

Теперь V_0 — объем одной грамм-молекулы. При нормальных условиях $V_0 = 22{,}4$ *л*, $p_0 = 1$ *атм*, $T = 273°$ К. Подставив эти значения, получим

$$R = 0{,}082 \frac{л \cdot атм}{моль \cdot град}.$$

Если количество газа равно n грамм-молекулам, то

$$\frac{pV}{T} = nR.$$

А так как

$$n = \frac{m}{\mu},$$

где m — масса газа, μ — молекулярный вес, то формула объединенного закона газового состояния принимает вид

$$pV = \frac{m}{\mu} RT. \tag{5.7}$$

По-другому эту формулу называют уравнением состояния идеального газа (закон Клапейрона — Менделеева).

Заметим, что все три предыдущие закона (Бойля — Мариотта, Гей-Люссака и Шарля) легко выводятся из объединенного закона газового состояния (5.4) как частные случаи, если соответственно полагать $T = \text{const}$, $p = \text{const}$ или $V = \text{const}$ и учесть, что $T = t + 273^\circ$, $\alpha = 1/273$.

Вопросы для самопроверки

1. Что показывают коэффициенты линейного и объемного расширения?
2. Как вычисляется коэффициент объемного расширения твердых тел?
3. Как изменяется плотность тела с изменением температуры?
4. Как велики коэффициенты расширения жидкостей по сравнению с коэффициентами расширения твердых тел?
5. Какой процесс называется изотермическим?
6. Какой процесс называется изобарическим?
7. Какой процесс называется изохорическим?
8. Какая разница между идеальным газом и реальными газами?
9. Графики законов Гей-Люссака и Шарля показывают, какой температуры можно достигнуть, чтобы объем или давление газа стали равными нулю. Почему в действительности объем и давление газа не могут быть равными нулю ни при какой температуре?
10. Как связаны шкала Цельсия и абсолютная шкала температур?
11. Пользуясь уравнением состояния идеального газа, получите три газовых закона.

Задачи для закрепления

Задачник под редакцией П. А. Знаменского, номера: 587, 589, 590, 592, 598, 599, 602, 603, 605, 606, 623, 626, 631, 632, 635, 638, 639, 641, 642.

Примеры решения задач

Задача 1.1. Стальной стержень, имеющий площадь поперечного сечения $S = 10$ *см*^{2}, своими концами упирается в две жестко закрепленные массивные стальные плиты. С какой силой стержень будет давить на каждую из плит, если его температура повысится на 15° С? Модуль упругости для стали считать равным $E = 2{,}1 \cdot 10^6$ *кг/см*^{2}, а коэффициент линейного расширения стали $\beta = 1{,}1 \cdot 10^{-5}$ *град*$^{-1}$.

Решение. В задаче не сказано, от какой начальной температуры происходит нагревание стержня, поэтому для удобства примем, что от 0° С.

Если бы стержень был свободен, то при нагревании на $t°$ его длина увеличилась бы на величину

$$l - l_0 = \beta l_0 t.$$

Но стержню не дают увеличиваться в размере, поэтому величина $l - l_0$ будет определять деформацию сжатия стержня. Получается так, как будто стержень длиной l путем сжатия укоротили до длины l_0. По закону Гука сила давления стержня будет

$$F = \frac{SE}{l_0}(l - l_0);$$

то есть в нашем случае

$$F = SE\beta t.$$

Расчет дает величину

$$F = 3465 \text{ кГ}.$$

Задача 1.2. Рассчитать, какое давление имеет азот в количестве $m = 1$ *кг*, занимающий объем 1 *м*^{3} при температуре 27° С.

Решение. Для расчета воспользуемся уравнением состояния идеального газа

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

причем $T = t°\,\text{C} + 273°$. Величины V, T, m и R известны. Атомный вес азота равен 14, молекулярный — 28 *г/моль*. Находим давление:

$$p = \frac{1000 \text{ г} \cdot 300° \text{ K}}{28 \frac{\text{г}}{\text{моль}} \cdot 1000 \text{ л}}\, 0{,}082 \frac{\text{л} \cdot \text{атм}}{\text{моль} \cdot \text{град}} = 0{,}88 \text{ атм}.$$

Задача 1.3. Посредине узкой, запаянной с обоих концов горизонтальной трубки находится столбик ртути длиной $h = 100$ *мм*. В обеих половинках трубки находится воздух под давлением $p_0 = 760$ *мм рт. ст.* Трубку поставили вертикально. Спрашивается, на какое расстояние сместится столбик ртути, если длина всей трубки 100 *см*?

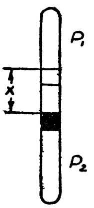


Рис. 36.

Решение. Обозначим через l_0 длину той части трубки, которую занимает воздух в каждой половине при горизонтальном положении. Когда трубку поставили вертикально, столбик ртути сместился на отрезок x, причем в верхней части давление стало p_1, в нижней — p_2 (рис. 36). В условии задачи не сказано, что температура изменилась, следовательно, можно воспользоваться законом Бойля — Мариотта. Запишем для верхней и нижней половинок трубки:

$$l_0 S p_0 = (l_0 + x) S p_1,$$
$$l_0 S p_0 = (l_0 - x) S p_2,$$

где S — площадь сечения трубки. Из условия равновесия столбика ртути под действием давлений p_2, p_1 и собственного веса получаем еще одно уравнение:

$$S p_2 = S p_1 + \text{вес рт. ст.}$$

или поскольку давление p_2 и p_1 выражаем в *мм рт. ст.*,

$$p_2 = p_1 + h.$$

В целом имеем систему трех уравнений с тремя неизвестными:

$$(l_0 + x) p_1 = l_0 p_0,$$
$$(l_0 - x) p_2 = l_0 p_0,$$
$$p_2 - p_1 = h,$$

решая которую относительно x, получаем:

$$x \simeq 4{,}5 \text{ см}.$$

2. ТЕПЛООБМЕН

Требования программы

Количество теплоты. Единицы количества теплоты: джоуль, калория. Формула подсчета количества теплоты, необходимой для нагревания тела.

Определение удельной теплоемкости вещества опытным путем. Теплотворная способность топлива. Коэффициент полезного действия нагревателя.

Плавление. Определение удельной теплоты плавления опытным путем.

Парообразование и конденсация. Кипение. Зависимость температуры кипения от давления. Определение удельной теплоты парообразования воды опытным путем.

М. В. Ломоносов о природе теплоты. Механический эквивалент теплоты. Тепловой эквивалент работы (для килограммометра и джоуля).

Каждое тело обладает внутренней энергией, которая складывается из кинетической энергии хаотического движения молекул и потенциальной энергии их взаимодействия. Величина внутренней энергии тела зависит от его температуры, давления и ряда других факторов. Количество тепла есть мера переданной телу или отведенной от него энергии хаотического движения молекул.

Нужно запомнить относящиеся к тепловому движению понятия количества теплоты, калории, теплоемкости, удельной теплоемкости, удельной теплоты плавления, удельной теплоты парообразования, теплотворной способности.

Тепло может переходить в механическую энергию и наоборот, причем эти переходы совершаются в строго эквивалентных количествах. В принятой сейчас предпочтительной системе единиц СИ количество теплоты измеряется механическими величинами, т. е. в джоулях. Приближенно 1 *дж* = 0,24 *кал*, 1 *кал* = 4,2 *дж*. Для решения задач на теплоту главное—умение составлять тепловой баланс. Определяют, какие тела отдали теплоту и какие приняли, подсчитывают количество отданной теплоты и приравнивают ее количеству принятой. Из полученного таким образом уравнения находят неизвестную величину.

При нагревании или охлаждении тела количество переданного тепла пропорционально массе тела и разности температур:

$$Q = mc(t_2 - t_1),$$

где c — удельная теплоемкость тела.

При плавлении количество тепла, необходимого для того, чтобы расплавить m граммов вещества, определяется по формуле: $Q = m\lambda$, где λ — удельная теплота плавления.

Обращение в пар m граммов жидкости при температуре кипения требует затраты тепла $Q = Lm$, где L — удельная теплота парообразования.

Источниками тепловой энергии во многих случаях являются различные химические соединения: твердые (уголь, дрова), жидкие (нефть) и газообразные (естественные или искусственные горючие газы). Энергетическая отдача их неравноценна, поэтому для характеристики энергетической ценности топлива вводят понятие теплотворной способности. Теплотворной способностью называют количество тепла, выделяющегося при полном сгорании 1 *кг* топлива. Теплотворная способность нефти 46 000 *кдж/кг*, торфа — 20 900 *кдж/кг*, дров — 11 300 *кдж/кг*. Обозначая теплотворную способность буквой r, получим следующую формулу для подсчета теоретического тепла, выделяющегося при сгорании m *кг* топлива:

$$Q = rm.$$

Чтобы учесть только полезное тепло, нужно знать КПД установки.

Указанные четыре формулы позволяют составлять уравнения теплового баланса для достаточно большого числа тепловых процессов.

Вопросы для самопроверки

1. Чем определяется внутренняя энергия тела?
2. Что такое количество теплоты?
3. Какими единицами измеряется количество теплоты?
4. Что такое удельная теплоемкость вещества?
5. Что такое теплоемкость тела?
6. Как можно измерить удельную теплоемкость?
7. Что такое механический эквивалент теплоты?
8. Частным случаем какого закона является уравнение теплового баланса?
9. Что такое теплотворная способность топлива?

10. Что называется точкой плавления и точкой отвердевания?

11. В чем различие плавления кристаллических и аморфных тел?

12. Как изменяется объем вещества при плавлении?

13. Что называется удельной теплотой плавления?

14. Как определить удельную теплоту плавления калориметрическим способом?

15. Что называется удельной теплотой парообразования?

16. Зависит ли удельная теплота парообразования от температуры?

Задачи для закрепления

Задачник под редакцией П. А. Знаменского, номера: 540, 545, 548, 549, 550, 556, 560, 565, 579, 700, 704, 705, 717, 720, 721, 726.

Примеры решения задач

Задача 2.1. Смесь из свинцовых и алюминиевых опилок с общей массой 150 *г* и температурой 100° С погружена в калориметр с водой, температура которой 15° С, масса 230 *г*. Окончательно установилась температура 20° С. Теплоемкость калориметра 10 *кал/град*. Сколько свинца и алюминия было в смеси?

Решение. Масса опилок $m_с + m_а = 150$ *г*. Начальная температура опилок $t_с = t_а = 100°$ С. Начальная температура воды и калориметра $t_в = t_к = 15°$ С. Масса воды $m_в = 200$ *г*. Температура, установившаяся после обмена теплотой, $\theta = 20°$ С. Теплоемкость калориметра $c_к m_к = 10$ *кал/град*.

Из условия ясно, что теплоту получали калориметр с водой, а отдавали опилки.

$$Q \text{ полученное} = Q_к + Q_в,$$

$$Q \text{ отданное} = Q_с + Q_а.$$

Количество теплоты, полученное калориметром:

$$Q_к = c_к m_к (\theta - t_к).$$

Количество теплоты, полученное водой:

$$Q_в = c_в m_в (\theta - t_с).$$

Количество теплоты, отданное свинцовыми опилками:

$$Q_с = c_с m_с (t_с - \theta).$$

Количество теплоты, отданное алюминиевыми опилками:

$$Q_а = c_а m_а (t_а - \theta).$$

Уравнение теплового баланса будет:

$$Q_к + Q_в = Q_с + Q_а,$$

или

$$(c_к m_к + c_в m_в)(\theta - t_к) = (c_с m_с + c_а m_а)(t_с - \theta).$$

Решая это уравнение с учетом, что

$$m_с + m_а = 150\ г,$$

находим:

$$m_с = 95\ г,\ m_а = 55\ г.$$

3. ИСПАРЕНИЕ И КОНДЕНСАЦИЯ

Требования программы

Насыщающие и ненасыщающие пары. Их свойства. Зависимость давления насыщающего пара от температуры.

Абсолютная влажность. Относительная влажность. Гигрометры.

В данном разделе надо обратить внимание на явления, связанные с влажностью воздуха, и на способы определения влажности. Необходимо уметь пользоваться таблицами упругости насыщающего водяного пара.

Излагая материал о сжижении газов, надо подчеркнуть, что газ невозможно превратить в жидкость, если температура его выше критической.

Вопросы для самопроверки

1. Чем отличается испарение от кипения?

2. От каких условий зависит скорость испарения жидкости?

3. Какой пар называется насыщенным?

4. Как объясняется по молекулярно-кинетической теории испарение жидкости и насыщение пространства паром?

5. Почему при испарении жидкость охлаждается?

6. Происходит ли испарение твердых тел?

7. Как зависит температура кипения жидкости от внешнего давления?

8. Зависит ли давление и плотность насыщенного пара от объема? Что происходит при изменении объема насыщенного пара?

9. Зависит ли давление насыщенного пара от температуры?

10. Какими способами можно превратить ненасыщенный пар в насыщенный, а последний в жидкость?

11. Что такое критическая температура?

12. Что называется абсолютной влажностью?

13. В каких единицах измеряется абсолютная влажность?

14. Что называется относительной влажностью?

15. Что называется точкой росы?

Задачи для закрепления

Задачник под редакцией П. А. Знаменского, номера: 733, 736, 738, 741, 742.

VI ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

1. ЭЛЕКТРОСТАТИКА

Требования программы

Два рода электричества. Взаимодействие электрических зарядов. Закон Кулона. Влияние среды на силу взаимодействия зарядов. Диэлектрическая проницаемость вещества. Единицы заряда: кулон, электростатическая единица. Распределение электричества на поверхности проводника. Электростатическая индукция. Устройство электроскопа.

Электрическое поле заряда. Напряженность поля и ее вычисление для поля точечного заряда. Понятие о потенциале и разности потенциалов. Работа перемещения заряда в электрическом поле.

Единицы потенциала электрического поля: вольт, электростатическая единица. Электроемкость. Единицы электроемкости: фарада, сантиметр. Конденсатор, его устройство и назначение.

Закон Кулона справедлив только для взаимодействия точечных зарядов. Название точечный вовсе не означает, что размеры зарядов бесконечно малы. Точечными называются такие заряды, собственными размерами которых можно пренебречь по сравнению с расстоянием между ними. Формула

$$F = \frac{q_1 q_2}{r^2} \qquad (6.1)$$

описывает взаимодействие зарядов в вакууме. В непроводящей электричество среде сила взаимодействия между зарядами при тех же условиях становится меньше в ε раз:

$$F = \frac{q_1 q_2}{\varepsilon r^2}, \tag{6.2}$$

где ε — диэлектрическая постоянная.

Сила F в законе Кулона — величина векторная.

На основании закона Кулона получают единицу количества электричества в системе СГСЕ: $г^{\frac{1}{2}}\, см^{\frac{3}{2}}\, сек^{-1}$. В системе СИ единица количества электричества — кулон. $1\,к = 3 \cdot 10^9$ ед. заряда СГСЕ.

Поскольку сила в законе Кулона — вектор, то напряженность электрического поля, определяемая как

$$E = \frac{F}{q_1}, \tag{6.3}$$

есть тоже вектор. Стоящий в знаменателе заряд q_1 — тот, который мы вносим в поле. С другой стороны,

$$E = \frac{q}{r^2}. \tag{6.4}$$

Здесь q — заряд, который образует поле. Из формулы (6.3) видно, что напряженность есть сила, с которой электрическое поле действует на единичный положительный заряд.

Единицей напряженности в системе СГСЕ не пользуются. В системе СИ единицей напряженности будет вольт на метр (*в/м*). Вывод этой единицы дан несколько ниже.

Работа перемещения заряда в электрическом поле не зависит от формы пути, а зависит лишь от расположения начальной и конечной точек пути. Это дает возможность характеризовать электрические свойства поля отношением A/q, которое называют потенциалом данной точки поля и обозначают буквой φ:

$$\varphi = \frac{A}{q}. \tag{6.5}$$

Потенциал — величина скалярная. Если две точки поля имеют два различных потенциала φ_1 и φ_2, то разность потенциалов измеряется работой, совершенной силами поля при перенесении единичного положительного заряда из одной точки поля в другую:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A_{1,2}}{q}. \tag{6.6}$$

Разность потенциалов иначе называют напряжением. Единицы потенциала следующие. В системе СГСЕ:

$$\frac{\text{эрг}}{\text{ед. заряда СГСЕ}} = г^{\frac{1}{2}} \cdot см^{\frac{1}{2}} сек^{-1}.$$

В системе СИ: $\frac{джоуль}{кулон}$ = вольт. Соотношение между ними:

$$1\,в = \frac{1}{300}\ \text{ед. пот. СГСЕ}. \tag{6.7}$$

Последним соотношением можно воспользоваться для того, чтобы вывести единицу измерения напряженности в системе СИ. Вывод делается на базе формулы (6.4):

$$[E] = \frac{[q]}{[r]^2} = \frac{\text{кулон}}{м^2} = \frac{3 \cdot 10^9 г^{\frac{1}{2}} см^{\frac{3}{2}} сек^{-1}}{100\ см \cdot м} =$$

$$= 3 \cdot 10^7 \frac{\text{ед. пот. СГСЕ}}{м} = 3 \cdot 10^7 \frac{300\,в}{м} = 9 \cdot 10^9 \frac{в}{м},$$

то есть, если результат вычислений получился в единицах $к/м^2$, то для перевода в единицы $в/м$ нужно пользоваться соотношением

$$1 \frac{к}{м^2} = 9 \cdot 10^9 \frac{в}{м}. \tag{6.8}$$

Обратимся теперь к формуле (6.3). Силу F можно выразить через работу, деленную на путь

$$F = \frac{A}{s},$$

а работу по формуле (6.5) через потенциал и заряд, так что

$$н = [F] = \frac{[\varphi]\,[q]}{[s]} = \frac{в \cdot к}{м}.$$

На основании этого соотношения

$$[E]=\frac{[F]}{[q]}=\frac{в\cdot к}{м\cdot к}=\frac{в}{м}.$$

Следовательно, размерность *н/к* равна размерности *в/м*. Это одно и то же.

Емкость проводника — это величина, измеряемая отношением заряда проводника к его потенциалу:

$$C=\frac{q}{\varphi}.$$

Емкость в системе СИ измеряется в фарадах

$$[C]=\frac{к}{в}=ф,$$

в системе СГСЕ — в сантиметрах:

$$[C]=\frac{г^{\frac{1}{2}}\,см^{\frac{3}{2}}\,сек^{-1}}{г^{\frac{1}{2}}\,см^{\frac{1}{2}}\,сек^{-1}}=см.$$

Соотношение между фарадой и сантиметром следующее:

$$ф=\frac{к}{в}=\frac{3\cdot 10^9\,г^{\frac{1}{2}}\,см^{\frac{3}{2}}\,сек^{-1}}{\frac{1}{300}\,г^{\frac{1}{2}}\,см^{\frac{1}{2}}\,сек^{-1}}=9\cdot 10^{11}\ см.$$

Кстати, из этого соотношения можно получить, что

$$1\,к=9\cdot 10^{11}\ см\cdot в=9\cdot 10^{9}\ м\cdot в.$$

Вопросы для самопроверки

1. Какие заряды называются точечными?
2. Какова сила взаимодействия точечных зарядов в вакууме?
3. Как влияет на величину силы взаимодействия между зарядами наличие однородной непроводящей среды?
4. В каких единицах измеряется количество электричества? Каково соотношение между этими единицами?

5. Что такое напряженность электрического поля? Как определяется направление вектора напряженности?

6. Как графически изображается электрическое поле?

7. Как вычисляется напряженность электрического поля точечного заряда?

8. Как определяется напряженность поля нескольких зарядов?

9. От чего зависит работа перемещения заряда в электрическом поле?

10. Что называется потенциалом точки поля?

11. Какое электрическое поле называется однородным?

12. Какова связь между напряженностью и потенциалом для однородного электрического поля?

13. Что такое эквипотенциальная поверхность?

14. Чему равна работа перемещения заряда вдоль эквипотенциальной поверхности?

15. Что такое электроемкость проводника?

16. От чего зависит емкость проводника?

17. От чего зависит емкость плоского конденсатора?

18. В каких единицах измеряется емкость? Каково соотношение между единицами емкости?

Задачи для закрепления

Задачник под редакцией П. А. Знаменского, номера: 763, 768, 769, 771, 778, 780, 784, 790, 792, 794, 796, 797, 798, 804, 805, 806, 807, 808, 811.

Примеры решения задач

Задача 1.1. Железный шарик зарядили до величины $+q$. Что нужно сделать, чтобы весь заряд шарика передать металлическому стакану?

Решение. Нужно ввести шарик в полость стакана, не касаясь стенок. Тогда за счет индукции на внутренней поверхности стакана наведется заряд $(-q)$, а на внешней $(+q)$. Если теперь прикоснуться шариком к стенке, его заряд и заряд внутренней стенки нейтрализуются. Шарик можно убрать: на внешней поверхности стенки стакана останется заряд $(+q)$.

Задача 1.2. Имеется два одинаковых металлических шарика. На одном заряд $q_1 = +27$ ед. СГСЕ, на другом — неизвестный отрицательный заряд q_2. Шарики привели в соприкосновение и затем поместили на расстоянии 5 *см* друг от друга, причем сила отталкивания между ними 4 *дн.* Определить первоначальный заряд второго шарика.

Решение. Так как размеры шариков одинаковы, то после соприкосновения они будут иметь одинаковые заряды величиной q, следовательно, сила взаимодействия между ними по закону Кулона будет

$$F = \frac{q^2}{r^2},$$

откуда

$$q = \pm r\sqrt{F} = \pm 10 \text{ ед. СГСЕ}.$$

Общий заряд шариков $2q = \pm 20$ ед. СГСЕ. По условию задачи первый до соприкосновения имел заряд $+27$ ед. СГСЕ, значит, второй мог иметь заряд либо $q_2 = -7$ ед. СГСЕ, либо $q_2 = -47$ ед. СГСЕ.

Задача 1.3. Два закрепленных заряда $q_1 = 10$ ед. СГСЕ и $q_2 = 40$ ед. СГСЕ находятся на расстоянии 12 *см* друг от друга. Где надо поместить третий заряд, чтобы он находился в равновесии?

Решение. Для того чтобы третий заряд находился в равновесии, он должен располагаться на прямой, соединяющей закрепленные заряды (рис. 37).

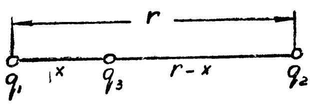


Рис. 37.

Обозначим через r расстояние между закрепленными зарядами, а через x — расстояние между первым и третьим зарядами. Запишем силы кулоновского взаимодействия между зарядами:

$$F_1 = \frac{q_1 q_3}{x^2}, \quad F_2 = \frac{q_2 q_3}{(r-x)^2}.$$

В момент равновесия эти силы должны быть равны, следовательно,

$$\frac{q_1 q_3}{x^2} = \frac{q_2 q_3}{(r-x)^2},$$

откуда получаем квадратное уравнение

$$x^2(q_2 - q_1) + 2q_1 r x - q_1 r^2 = 0.$$

Его решением будут корни

$$x = \frac{-q_1 r \pm r\sqrt{q_1 q_2}}{q_2 - q_1}.$$

После численной подстановки будем иметь:

$$x = 4 \text{ см}.$$

(корень $x = -12$ *см* не имеет физического смысла).

Задача 1.4. Двум одинаковым шарикам, подвешенным на нитях равной длины так, что они соприкасаются друг с другом, сообщили (обоим вместе) заряд $q_0 = 4 \cdot 10^{-7}$ *к*, после чего они разошлись настолько, что угол между нитями стал равен 60° (рис. 38). Определить вес каждого из шариков, если длина нити и у того, и у другого равна 20 *см*. Радиусы шариков считать очень малыми по сравнению с расстоянием r между ними.

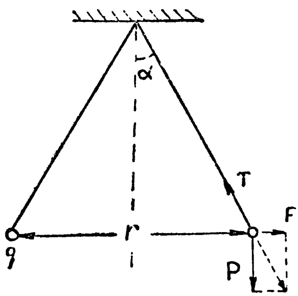


Рис. 38.

Решение. На каждый шарик, как показано на рис. 38, действуют три силы: вес шарика P, кулоновская сила отталкивания F и сила натяжения нити T. Так как шарики находятся в покое, сумма действующих сил равна нулю. Глядя на рис. 38, можно написать следующие равенства:

$$F = P \operatorname{tg} \alpha = \frac{q^2}{r^2},$$

$$\frac{r}{2} = l \sin \alpha.$$

Из обоих равенств найдем:

$$P = \frac{q^2}{4l^2 \sin^2 \alpha \operatorname{tg} \alpha}$$

или, поскольку $q = \frac{1}{2} q_0$,

$$P = \frac{q_0^2}{16l^2 \sin^2 \alpha \operatorname{tg} \alpha}. \tag{6.9}$$

В нашем случае $\alpha = 30°$, $\frac{1}{2} r = \frac{1}{2} l$, так что

$$\sin \alpha = \frac{1}{2},$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{1}{\sqrt{3}},$$

в силу чего равенство (6.9) примет вид:

$$P = \left(\frac{q_0}{2l}\right)^2 \sqrt{3}.$$

Численно $P = 900\sqrt{3}$ *дн* $\approx 1{,}6$ *г.*

Задача 1.5. Имеются пластины, разность потенциалов между которыми $U = 700$ *в*, а расстояние $d = 4$ *мм*. Между пластинами неподвижно висит капелька масла, радиус которой $r = 0{,}00015$ *см*. Плотность масла $\rho = 0{,}8$ *г/см*^{3}. Какой заряд e имеет капля?

Решение. Капля находится в равновесии (рис. 39), сумма сил, действующих на нее, равна нулю, следовательно,

$$mg = eE.$$

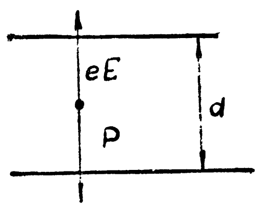


Рис. 39.

Масса капли

$$m = \rho V = \rho \frac{4}{3} \pi r^3.$$

Напряженность поля

$$E = \frac{U}{d}.$$

С учетом последних двух равенств первое приобретает вид

$$\frac{4}{3} \pi r^3 \rho g = \frac{eU}{d},$$

откуда

$$e = \frac{4\pi r^3 \rho g d}{3U} = 1{,}9 \cdot 10^{-9} \text{ ед. СГСЕ.}$$

Задача 1.6. Для определения емкости электрометра он был заряжен до потенциала U_1, а затем соединен тонким проводником с металлическим шаром радиуса r. После соединения электрометр показал потенциал U_2. Определить емкость электрометра.

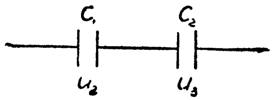


Рис. 40.

Решение. Присоединение к электрометру шара эквивалентно последовательному соединению двух конденсаторов, один из которых электрометр, а другой шар (рис. 40).

Обозначим через C_1 емкость электрометра, C_2 — емкость шара, q_1 и U_1 — заряд и потенциал электрометра до присоединения к нему шара, q_2 и U_2 — заряд и потенциал электрометра после присоединения к нему шара, q_3 и U_3 — заряд и потенциал шара (конденсатор C_2 на рис. 40).

Если пренебречь сопротивлением проводника и утечкой заряда, можно записать:

$$q_1 = q_2 + q_3. \tag{6.10}$$

Заряд с электрометра будет перетекать на шар до тех пор, пока их потенциалы не станут равными:

$$U_2 = U_3. \tag{6.11}$$

Запишем, что

$$U_1 = \frac{q_1}{C_1}, \tag{6.12}$$

$$U_2 = \frac{q_2}{C_1}, \tag{6.13}$$

$$U_3 = \frac{q_3}{C_3}. \tag{6.14}$$

Находя из последних трех выражений заряды и подставляя их в уравнение (6.10), получим

$$C_1 U_1 = C_1 U_2 + C_2 U_3$$

или

$$C_1U_1 = C_1U_2 + C_2U_2$$

в силу равенства (6.11). Следовательно, емкость C_1 электрометра будет

$$C_1 = \frac{C_2U_2}{U_1 - U_2} = \frac{rU_2}{U_1 - U_2}.$$

Дополнительный материал

Об электрических зарядах

Названия „положительный" или „отрицательный" даются зарядам совершенно произвольно; названия не отражают физической сущности зарядов. Такое разделение ввел 200 лет назад Франклин, и оно оказалось чрезвычайно удобным для науки и практики.

Аналогично закону сохранения энергии существует закон сохранения зарядов. Он гласит, что в системе, не допускающей потери зарядов в окружающую среду, алгебраическая сумма зарядов всегда остается постоянной. Поскольку еще никто не наблюдал нарушения этого закона, он считается абсолютно строгим.

Наименьшим известным науке количеством электричества является заряд электрона или заряд протона. Разделить заряд электрона на доли не удается. Заряду электрона, как известно, приписывают отрицательный знак. Протон обладает зарядом, по величине в точности равным заряду электрона, но противоположного знака. Любое количество отрицательного или положительного электричества является суммой целого числа зарядов электрона или протона.

Парадоксы, связанные с электростатикой

Первый. Нетрудно сделать плоский конденсатор с помощью двух пластин, из которых нижняя закреплена, а верхняя подвешена к плечу рычажных весов. Зарядив такой конденсатор, можно убедиться, что, как ни странно, сила притяжения между пластинами мало изменится, если их немного сблизить, хотя по закону Кулона она должна возрастать обратно пропорционально квадрату расстояния между зарядами. В чем тут дело?

Дело в том, что закон Кулона справедлив лишь для точечных зарядов, то есть таких, размерами которых можно пренебречь по сравнению с расстоянием между ними. Взаимодействие заряженных пластин рассчитывается по другой формуле.

Второй. Через отверстие в большой металлической сфере с помощью шарика можно внести заряд внутрь и, касаясь, отдавать его сфере. Опыт показывает, что какой бы заряд ни накопился на сфере, шарик все равно продолжает отдавать свой заряд сфере.

С объяснением этого явления возможна следующая трудность.

Пусть потенциалы сферы и шарика будут соответственно

$$\varphi_1 = \frac{Q}{R} \text{ и } \varphi_2 = \frac{q}{r},$$

причем Q и q — заряды положительные. В начале переноса, когда Q ненамного больше q, потенциал сферы $\varphi_1 < \varphi_2$, поскольку $R \gg r$. Но как только заряд сферы сделается достаточно большим, φ_1 станет больше φ_2 и самопроизвольный переход заряда от шарика к сфере должен прекратиться, ибо положительный заряд сам никогда не переходит от тела с меньшим потенциалом к телу с большим потенциалом. Но в опыте — переходит! Значит ли это, что в данном опыте нарушается закон движения зарядов?

Нет, конечно. В рассуждениях мы использовали формулу потенциала уединенного заряженного шара для объяснения поведения системы „шарик внутри сферы“, что совершенно недопустимо. Естественно, что в результате такого вольного подхода получили ложный вывод. На самом деле в момент прикосновения потенциал шарика всегда больше потенциала сферы. И лишь после того как заряд шарика переходит на сферу, их потенциалы становятся равными. Следовательно, закон движения зарядов в данном случае не нарушается.

2. ПОСТОЯННЫЙ ТОК В МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПРОВОДНИКАХ

Требования программы

Электрический ток. Сила тока. Единица силы тока — ампер. Разность потенциалов на концах проводника. Закон Ома для участка цепи. Сопротивление проводников. Единица сопротивления — ом. Удельное сопротивление. Формула для вычисления сопротивления. Зависимость сопротивления от температуры. Реостаты. Последовательное и параллельное соединение проводников. Закон Ома для всей цепи.

Работа и мощность тока. Энергия электрического тока и ее превращение в другие виды энергии. Закон Джоуля — Ленца. Внесистемная единица мощности тока — киловатт. Внесистемная единица работы и энергии тока — киловатт-час.

Начиная проработку этого раздела, нужно прежде всего хорошо усвоить такие понятия, как ток, напряжение, сопротивление.

Электрическим током называется упорядоченное движение любых электрических зарядов.

В металлах носителями зарядов являются электроны. Электроны движутся хаотически, если отсутствует внешнее электрическое поле (разность потенциалов равна нулю); если же на концах проводника появляется разность потенциалов, то под воздействием электрического поля на хаотическое движение электронов накладывается упорядоченное, однонаправленное движение.

Металлы называются проводниками первого рода.

В жидкостях носителями зарядов являются ионы, в газах — ионы и электроны.

Жидкости и газы представляют собой проводники второго рода.

Количество электричества, проходящее в единицу времени через поперечное сечение проводника, называется силой тока

$$I = \frac{q}{t}.$$

В качестве единицы измерения силы тока употребляется только единица системы СИ — ампер. Это — основная единица.

Для участка металлического проводника отношение напряжения U к силе тока I есть величина постоянная, называемая электрическим сопротивлением проводника (закон Ома):

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

Единица электрического сопротивления — ом является производной и получается из закона Ома:

$$[R] = \frac{\text{вольт}}{\text{ампер}} = \text{ом}.$$

Величина сопротивления зависит от формы проводника и от его температуры. Для определения сопротивления цилиндрических проводников (проволок) с постоянным поперечным сечением пользуются формулой

$$R = \rho \frac{l}{S},$$

где ρ — удельное сопротивление проводника в $\frac{\textit{ом} \cdot \textit{мм}^2}{\textit{м}}$, l — его длина в *м*, S — площадь поперечного сечения в *мм*^{2}. У пластин и вообще проводников другой формы сопротивление рассчитывается более сложным путем.

Зависимость сопротивления от температуры проводника описывается формулой

$$R_t = R_0 (1 + \alpha t).$$

Для лучшего запоминания этой формулы полезно сравнить ее вид с видом уже знакомых формул зависимости длины и объема от температуры:

$$l_t = l_0 (1 + \beta t),$$
$$V_t = V_0 (1 + \alpha t).$$

Сразу бросается в глаза, что с математической точки зрения все три формулы имеют совершенно одинаковую структуру.

Закон Ома для всей цепи имеет вид

$$I = \frac{E}{R + r},$$

где E — электродвижущая сила источника тока, r — его внутреннее сопротивление, R — сопротивление цепи.

Трудность в применении закона Ома для всей цепи заключается в том, что здесь надо учитывать знаки электродвижущих сил, действующих в цепи, и направления токов. Сила тока, протекающего по участку цепи, на котором действует источник ЭДС, определяется совместным действием разности потенциалов на концах цепи U и ЭДС источника E внутри цепи, то есть

$$IR = U \pm E.$$

Выбор знака (+ или —) определяется способом включения ЭДС.

Работа электрического тока определяется как произведение количества перенесенных зарядов на разность потенциалов между начальной и конечной точками переноса:

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

Эта формула служит определением, но она неудобна для подсчета величины работы. Произведем замену:

$$q = It, \quad \varphi_1 - \varphi_2 = U,$$

чтобы получить выражение работы через величины, легко поддающиеся измерению:

$$A = IUt.$$

По первой формуле определим единицы измерения работы:

$$[A] = [q][\varphi_1 - \varphi_2].$$

В системе СИ $[q]$ = кулону, $[\varphi_1 - \varphi_2]$ = вольту.

$$[A] = k \cdot b = 3 \cdot 10^9\ г^{\frac{1}{2}}\ см^{\frac{3}{2}} сек^{-1} \cdot \frac{1}{300}\ г^{\frac{1}{2}}\ см^{\frac{1}{2}}\ сек^{-1} =$$

$$= 10^7 \frac{г \cdot см^2}{сек^2} = 10^7\ эрг = 1\ дж.$$

Следовательно, кулон × вольт = джоулю или *а·в·сек* = *дж*. В системе СГС работа измеряется в эргах.

Соответственно мощность как работа в единицу времени будет измеряться в *дж/сек* и *эрг/сек·дж/сек* или ab иначе называется ваттом. Рассматривая соотношение размерностей

$$\frac{\textit{дж}}{\textit{сек}} = \textit{вт},$$

как алгебраическую формулу, получим:

$$\textit{дж} = \textit{вт} \cdot \textit{сек}$$

и отсюда — более крупные единицы измерения работы:

$$3600 \ \textit{дж} = \textit{вт} \cdot 3600 \ \textit{сек} = 1 \ \textit{вт-час},$$

$$3600\,000 \ \textit{дж} = 1000 \ \textit{вт} \cdot \textit{час} = 1 \ \textit{квт-час}.$$

Напомним, что в системе СИ не только работа, но и тепловая энергия измеряются в джоулях. Следовательно, нет никакой необходимости вводить коэффициент 0,24 в закон Джоуля—Ленца, назначение которого переводить джоули в калории. Будем иметь:

$$Q = IUt, \quad Q = I^2Rt \quad \text{или} \quad Q = \frac{U^2}{R}t.$$

Энергия электрического тока в замкнутой цепи непрерывно расходуется, т. е. переходит в другие формы энергии: тепловую, механическую, световую и т. д. Поэтому для поддержания в цепи постоянного тока требуется постоянная затрата работы.

При соединении ряда приборов необходимо учитывать следующее.

У электроприборов, соединенных параллельно, на зажимах будет одинаковое напряжение. Наибольшее количество тепла выделится в приборе с малым сопротивлением.

В последовательно соединенных электроприборах течет одинаковый ток. В этом случае наибольшее количество тепла будет выделяться в приборе с наибольшим сопротивлением.

Сопротивление проводки должно быть значительно меньше сопротивления приборов. При этом выделение тепла в проводах будет мало, падение напряжения тоже, и практически все напряжение сети будет приложено к прибору.

Вопросы для самопроверки

1. Что называется электрическим током?
2. Каково условие существования электрического тока?
3. Как выбирается направление тока?
4. Что является переносчиком зарядов в металлах, жидкостях, газах?
5. Что называется силой тока?
6. Что такое плотность тока?
7. Как формулируется закон Ома для участка цепи?
8. В каких единицах измеряется сила тока и сопротивление проводников?
9. Что такое удельное сопротивление?
10. От чего зависит сопротивление проводника?
11. По какому закону зависит сопротивление проводника от температуры?
12. Что такое реостат?
13. Каково полное сопротивление цепи из последовательно соединенных проводников?
14. Каково полное сопротивление цепи из параллельно соединенных проводников?
15. Что такое ЭДС источника тока?
16. При каких условиях ЭДС элемента равна разности потенциалов на его зажимах?
17. Прочитайте закон Ома для всей цепи.
18. Чему равны ЭДС и внутреннее сопротивление батареи одинаковых источников тока при последовательном соединении?
19. Чему равны ЭДС и внутреннее сопротивление батареи одинаковых источников тока при параллельном соединении?
20. Как подсчитывается работа тока на участке цепи?
21. Как подсчитывается мощность тока на участке цепи?
22. Какими единицами измеряются работа и мощность электрического тока?
23. Как читается закон Джоуля — Ленца?
24. Каким образом подсчитывается тепло, выделяемое током, в джоулях, калориях, килокалориях?
25. Как устроена электрическая лампочка?

26. Каков принцип работы нагревательных приборов?

27. Как устроены предохранители?

28. В какие другие виды энергии может превращаться электрическая энергия?

Задачи для закрепления

Задачник под редакцией П. А. Знаменского, номера: 839, 840, 842, 845, 848, 856, 862, 867, 868, 869, 890, 891, 894, 896, 909, 912, 915, 921, 923, 924, 926, 930, 947, 951, 960, 962, 965.

Примеры решения задач

Задача 2.1. На сколько равных частей надо разрезать проводник, чтобы при параллельном соединении этих частей получить сопротивление R?

Решение. Если сопротивление исходного проводника R_0, то его можно представить как последовательное соединение n проводников, каждый сопротивлением r, так что

$$R_0 = nr. \tag{6.15}$$

При параллельном соединении этих же n проводников получится сопротивление

$$\frac{1}{R} = \frac{n}{r}. \tag{6.16}$$

Из (6.16) находим, что $r = nR$, и подставляем в (6.15):

$$R_0 = n^2 R,$$

откуда

$$n = \sqrt{\frac{R_0}{R}}.$$

Задача 2.2. Определить общее сопротивление R куба, включенного в цепь вершинами, расположенными по диагонали (рис. 41), если куб сделан из отрезков одной проволоки и сопротивление каждого отрезка, представляющего собой ребро куба, равно r.

Решение. Угол куба A образован тремя отрезками, которые можно рассматривать как три параллельно соединенных проводника. Аналогично можно рассматривать и угол куба B. Каждый отрезок, образующий угол A, соединен двумя такими же отрезками, об-

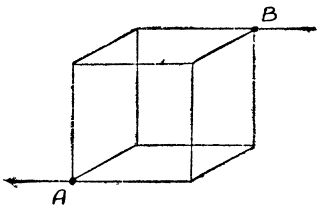


Рис. 41.

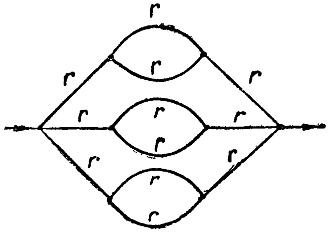


Рис. 42.

разующими угол B. Всего получается шесть параллельных кратчайших путей для тока, текущего от A к B. Поэтому вместо куба можно рассматривать эквивалентную схему, которая приведена на рис. 42.

Для каждой из трех ветвей можно написать

$$R_1 = R_2 = R_3 = 2r + \frac{r}{2} = \frac{5}{2} r.$$

Общее сопротивление будет $R = \frac{1}{3} R_1 = \frac{5}{6} r.$

Задача 2.3. Из отрезков проволоки с одинаковым сопротивлением составлена фигура, изображенная на рис. 43. Она включена в цепь точками A и B. Вычислить сопротивление фигуры.

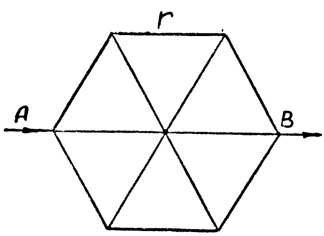


Рис. 43.

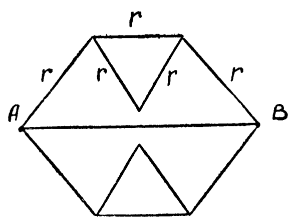


Рис. 44.

Решение. Заданную фигуру можно представить состоящей из трех отдельных ветвей — такая эквивалентная схема изображена на рис. 44.

Сопротивление R_1 только верхней ветви есть

$$R_1 = 2r + \frac{1}{\frac{1}{r} + \frac{1}{2r}} = \frac{8}{3}r.$$

Очевидно, оно в точности равно сопротивлению нижней ветви: $R_1 = R_3$. Сопротивление центральной ветви

$$R_2 = 2r.$$

Все ветви соединены параллельно, поэтому их общее сопротивление будет

$$R = \frac{1}{\frac{1}{2r} + \frac{6}{8r}} = 0{,}8r.$$

Задача 2.4. Три одинаковых сопротивления по R *ом* каждое соединены последовательно в цепь (рис. 45). Изменится ли сопротивление между концами A и D цепи, если точки A и C, B и D замкнуть накоротко?

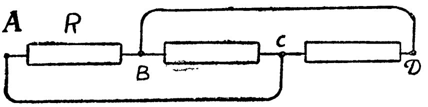


Рис. 45.

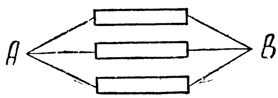


Рис. 46.

Решение. Эквивалентная схема того, что получилось после замыкания, изображена на рис. 46. Сразу видно, что из последовательного получилось параллельное соединение проводников. Если до замыкания сопротивление между точками A и D было $3R$, то после замыкания оно стало $\frac{1}{3}R$, т. е. уменьшилось в девять раз.

Задача 2.5. Девять одинаковых аккумуляторов соединены в батарею, как показано на рис. 47. Каждый имеет емкость 20 ампер-часов и ЭДС 2 вольта. Найти:

1) емкость батареи,
2) силу тока I во внешней цепи,
3) силу тока, текущего через один аккумулятор,
4) продолжительность непрерывной работы батареи.

Внутренним сопротивлением аккумуляторов пренебречь, внешнее сопротивление принять 2 *ома*.

Решение. 1) Емкость батареи, составленной по схеме рис. 42, будет такой же, как у батареи, составленной из трех параллельно соединенных аккумуляторов, т. е. будет равна 3.20 *а·час* = 60 *а·час*, или 60 *а*·3600 *сек* = 216·10³*к*, поскольку *а* × × *сек* = *к*. 2) Соединение аккумуляторов смешанное. При последовательном соединении ЭДС возрастает в n раз, значит, ЭДС каждой ветви будет 3·2 = = 6 *в*. Параллельное соединение не изменяет ЭДС, следовательно, ЭДС всей батареи тоже будет 6 *в*. На основании закона Ома для всей цепи, полагая $r = 0$, получаем:

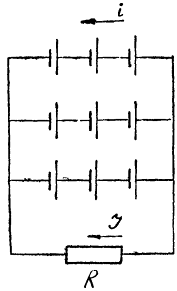


Рис. 47.

$$IR = 6 \text{ в}, \quad I = 3 \text{ а}.$$

3) Проходя через батарею, ток I проходит через три совершенно одинаковые ветви, а это означает, что через каждый аккумулятор течет ток, равный

$$i = \frac{1}{3} I = 1 \text{ а}.$$

4) Согласно определению,

$$I = \frac{q}{t},$$

причем выше уже подсчитана емкость всей батареи $216 \cdot 10^3$ *к*. Время непрерывной работы батареи, следовательно, будет

$$t = \frac{216 \cdot 10^3 \text{ к}}{3 \text{ а}} = 72 \cdot 10^3 \text{ сек} = 20 \text{ ч}.$$

Задача 2.6. Динамомашина, ЭДС которой 100 *в*, а внутреннее сопротивление 2 *ом*, в течение пяти часов заряжает батарею аккумуляторов. ЭДС батареи 75 *в*, внутреннее сопротивление 0,15 *ом*. Сопротивление подводящих проводов 0,35 *ом*. Найти: 1) напряжение на зажимах динамомашины, 2) напряжение на зажимах аккумуляторной батареи, 3) количество электричества, запасенное батареей за пять часов.

Решение. При зарядке аккумулятора его присоединяют так, чтобы зарядный ток от динамомашины шел навстречу разрядному току аккумулятора. Следовательно, ЭДС аккумулятора противоположна по знаку ЭДС динамомашины. Так как напряжение на зажимах динамомашины должно быть больше напряжения на зажимах аккумулятора, то ток зарядки будет течь внутри каждого аккумулятора от положительного полюса к отрицательному. Суммарная ЭДС в цепи будет равна разности ЭДС динамомашины и батареи.

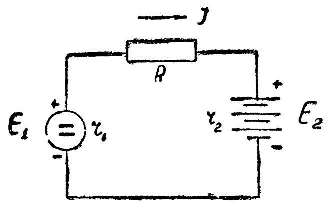


Рис. 48.

По закону Ома

$$E_1 - E_2 = I(r_1 + R + r_2),$$

$$I = \frac{E_1 - E_2}{R + r_1 + r_2},$$

где E_1, r_1 — ЭДС и внутреннее сопротивление динамомашины, E_2, r_2 — ЭДС и внутреннее сопротивление батареи, R — сопротивление подводящих проводов.

Напряжение на зажимах динамомашины

$$U_1 = E_1 - Ir_1 = E_1 - \frac{(E_1 - E_2)\, r_1}{R + r_1 + r_2} = 80\ \text{в}.$$

Напряжение на зажимах аккумуляторной батареи

$$U_2 = E_2 + Ir_2 = E_2 + \frac{(E_1 - E_2)\, r_2}{R + r_1 + r_2} = 76{,}5\ \text{в}.$$

Знак (+) перед I пишем потому, что ток I течет внутри аккумуляторов не от (—) к (+), а наоборот, т. е. он для батареи является отрицательным током.

Запасенный батареей заряд будет:

$$q = It = \frac{E_1 - E_2}{R + r_1 + r_2}\, t = 1{,}8 \cdot 10^5\ \text{к}.$$

Задача 2.7. Вольтметр, соединенный последовательно с сопротивлением $R = 10^4$ *ом* при включении в сеть с напряжением $U = 250$ *в* показывает $U_1 = 50$ *в*, а при соединении с сопротивлением R_x показывает

$U_2 = 10$ *в*. Найти внутреннее сопротивление вольтметра r и величину сопротивления R_x.

Решение. Для случая, когда вольтметр соединен с источником тока через сопротивление R, по закону Ома имеем:

$$U = I(R + r).$$

Вольтметр показывает напряжение U_1, следовательно, сила тока I, проходящая через него, будет

$$I = \frac{U_1}{r},$$

и ее значение можно подставить в первую формулу; получим

$$U = \frac{U_1}{r}(R + r),$$

или

$$Ur = U_1(R + r). \qquad (6.17)$$

Если вольтметр соединить с источником тока через сопротивление R_x, то, рассуждая так же, получим:

$$Ur = U_2(R_x + r). \qquad (6.18)$$

Решая уравнения (6.17) и (6.18) совместно, найдем:

$$r = \frac{U_1 R}{U - U_1} = 0{,}25 \cdot 10^4 \text{ ом},$$

$$R_x = \frac{(U - U_2)\, U_1 R}{U_2 (U - U_1)} = 12 \cdot 10^4 \text{ ом}.$$

Задача 2.8. Элемент замыкают один раз проволокой с сопротивлением $R_1 = 4$ *ом*, другой раз — проволокой с сопротивлением $R_2 = 9$ *ом*. В обоих случаях количество тепла, выделяющегося в проволоке за одинаковый промежуток времени, одно и то же. Определить внутреннее сопротивление r элемента.

Решение. Количество тепла, выделяющееся при прохождении тока, дается законом Джоуля — Ленца:

$$Q = I^2 R t.$$

Так как по условию задачи количество тепла, выделенного на сопротивлениях R_1 и R_2, одинаково, то

$$I_1^2 R_1 = I_2^2 R_2, \qquad (6.19)$$

где

$$I_1 = \frac{E}{R_1 + r},$$

$$I_2 = \frac{E}{R_2 + r}.$$

Подставляя значения сил токов в условие (6.19), получаем уравнение

$$\frac{E^2}{(R_1 + r)^2} R_1 = \frac{E^2}{(R_2 + r)^2} R_2$$

решив которое, найдем:

$$r = \sqrt{R_1 R_2} = 6 \text{ ом}.$$

Задача 2.9. Из пяти одинаковых элементов, соединенных последовательно, собрана батарея. ЭДС каждого элемента равна 2 *в*, внутреннее сопротивление 1,2 *ом*. Как надо присоединить к этой батарее две спирали сопротивлением 4 *ом* каждая, чтобы получить наибольшее количество теплоты? Какова будет полезная мощность при параллельном и последовательном включении спиралей?

Решение. По известным ЭДС элементов и условию последовательного включения находим ЭДС батареи:

$$E = 5 \cdot 2 \text{ в} = 10 \text{ в}.$$

Внутреннее сопротивление батареи

$$r = 5 \cdot 1{,}2 \text{ ом} = 6 \text{ ом}.$$

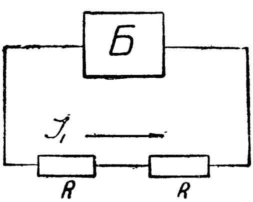


Рис. 49.

Рассмотрим сначала вариант с последовательным соединением спиралей (рис. 49). Пусть ток, который течет по цепи, равен I_1. На основании закона Ома:

$$E = I_1 r + I_1 R + I_1 R = I_1 (2R + r),$$

$$I_1 = \frac{E}{2R + r},$$

где R—сопротивление одной спирали. Падение напряжения на обеих спиралях будет

$$U_1 = 2I_1 R.$$

Выделяющаяся мощность

$$P_1 = U_1 I_1 = I_1^2 \cdot 2R.$$

Количество тепла, выделяющегося за время t,

$$Q_1 = P_1 t = I_1^2 2R.$$

Для параллельного соединения спиралей, изображенного на рис. 50, обозначим ток через I_2. Общее сопротивление спиралей будет

$$R_0 = \frac{R}{2}.$$

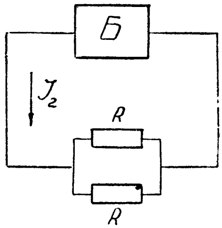


Рис. 50.

Закон Ома запишется как

$$E = I_2 r + I_2 \frac{R}{2} = I_2 \left(\frac{R}{2} + r\right),$$

$$I_2 = \frac{2E}{R + 2r}.$$

Падение напряжения на спиралях будет

$$U_2 = I_2 \frac{R}{2}.$$

Выделяющаяся мощность

$$P_2 = U_2 I_2 = I_2^2 \frac{R}{2}.$$

Количество тепла, выделяющегося за время t,

$$Q_2 = P_2 t = I_2^2 \frac{R}{2} t.$$

Для ответа на вопрос, в каком случае тепла выделится больше, найдем отношение

$$\frac{Q_1}{Q_2} = 4 \frac{I_1^2}{I_2^2} = \left(\frac{R + 2r}{2R + r}\right)^2.$$

После подстановки чисел получим, что

$$\frac{Q_1}{Q_2} \simeq 1,3.$$

Следовательно, при последовательном соединении спиралей тепла выделится больше.

3. ПОСТОЯННЫЙ ТОК В ЖИДКОСТЯХ И ГАЗАХ

Требования программы

Электролиз. Закон Фарадея для электролиза. Техническое применение электролиза.

Электрический ток в газах. Катодные лучи, их применение и свойства.

Прорабатывая тему „Электролиз“, нужно усвоить физический смысл законов Фарадея. При этом нельзя забывать, что первый закон Фарадея

$$m = k \cdot q$$

определяет массу вещества, выделившегося не вообще, а только на одном электроде. Эта масса численно равна электрохимическому эквиваленту, если через раствор пройдет один кулон электричества:

$$q = 1\ \textit{к},\ m = k.$$

Электрохимический эквивалент пропорционален химическому эквиваленту, представляющему собой отношение атомного веса вещества к его валентности

$$k = \frac{1}{F} \cdot \frac{A}{n}.$$

F — постоянная, которую называют числом Фарадея. Из объединенного закона Фарадея, полагая $m = A/n$, находим:

$$1 = \frac{1}{F} q \text{ или } q = F,$$

откуда следует, что для получения на электроде массы вещества, численно равной химическому эквиваленту, необходимо пропустить через раствор количество электричества, равное числу Фарадея: 96 494 *кулона*.

Изучая ток в газах, обратите особое внимание на условия проводимости газов.

Ток в газах может обеспечиваться несамостоятельной или самостоятельной проводимостью.

Несамостоятельная проводимость возможна при действии внешнего ионизатора. Величина тока насыщения определяется мощностью ионизатора.

Самостоятельная проводимость возникает благодаря ионизации через столкновения. Процесс этот носит лавинообразный характер, и ток при этом может возрастать весьма значительно: в сотни тысяч раз.

Катодные лучи можно рассматривать как предельный случай несамостоятельной проводимости. Важно обратить внимание на способы управления катодным лучом и на применение управляемого катодного луча в электронно-лучевой трубке.

Вопросы для самопроверки

1. Какое явление называется электролизом?
2. Как читается закон Фарадея?
3. Что такое электрохимический эквивалент?
4. Что такое химический эквивалент?
5. Каков физический смысл числа Фарадея?
6. Какие применения находит электролиз в технике?
7. Что является носителем зарядов в газах?
8. В чем заключается процесс ионизации газа через столкновения?
9. Каковы виды разрядов в газах?
10. Что такое катодные лучи? Каковы их свойства?
11. Почему при пропускании тока через электролиты они нагреваются?
12. Почему в менее плотном воздухе электрический разряд происходит при более низких напряжениях?

Задачи для закрепления

Задачник под редакцией П. А. Знаменского, номера: 969, 970, 972, 982, 985, 989, 994, 995, 997, 1000.

Примеры решения задач

Задача 3.1. Какова площадь поверхности никелируемой детали, если для получения слоя никеля толщиной $h = 0{,}01$ *мм* израсходовано 0,5 *квт-час* электроэнергии? Напряжение на зажимах электролитической ванны $U = 4$ *в*, плотность никеля $\rho = 8{,}8$ $г/см^3$, атомный вес $A = 59$. Никель двухвалентен.

Решение. По закону Фарадея масса выделившегося никеля

$$m = hS\rho = \frac{1}{F}\,\frac{A}{n}\,q,$$

где F — число Фарадея.

При этом была совершена работа, равная затраченной энергии,

$$W = qU.$$

Найдя отсюда q и подставив в закон Фарадея, получим

$$S = \frac{AW}{FU\rho hn}.$$

Выразив предварительно исходные данные в единицах системы СИ, будем иметь

$$S = 1500\ м^2.$$

Задача 3.2. Какое количество электричества q проходит через раствор соли меди за время 10 *сек*, если сила тока за это время равномерно возрастает от нуля до величины $I = 4a$? Сколько меди при этом выделится? Атомный вес меди $A = 63{,}6$, валентность $n = 2$.

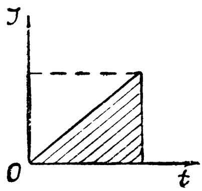


Рис. 51.

Решение. Подсчитаем прежде всего количество прошедшего электричества. Для этого построим график зависимости силы тока от времени (рис. 51). Площадь любой фигуры в таких координатах будет определяться произведением It, т. е. количеством электричества. В нашем случае фигура—треугольник, следовательно,

$$q = \frac{1}{2}\,It.$$

По закону Фарадея имеем:

$$m = \frac{1}{F}\,\frac{A}{n}\,q = \frac{1}{F}\,\frac{A}{n}\,\frac{It}{2}.$$

Подставляя условия задачи, находим: $m = 6{,}58\ г.$

Дополнительный материал

В последние годы электролиз нашел еще одно, совершенно необычное применение: в обработке сверхтвердых сплавов.

Долгое время внимание ученых и инженеров было направлено на изучение процессов, происходящих на катоде. Как известно, оседающий на нем металл весьма чист и может в точности копировать форму катода. На этом принципе основана гальванопластика и гальваностегия.

Но и другое явление — растворение анода — оказалось чрезвычайно полезным. Оно-то и лежит в основе электролитической резки, заточки и шлифовки твердых сплавов.

Для осуществления одной из этих операций обрабатываемую деталь делают анодом, „инструмент" — катодом, причем его лучше делать из хорошо проводящего ток металла (твердость не играет никакой роли). Между катодом и анодом с высокой скоростью пропускают электролит. Это нужно для того, чтобы он захватывал и уносил частицы металла, снимаемые с анода, не давая им осаждаться на катоде и менять его форму. Процесс регулируется силой тока.

Стоимость электролитической резки сплавов вдвое меньше, чем механической, а качество резки исключительно высокое. То же можно сказать о заточке резцов и высверливании отверстий. Но самое ценное то, что с помощью электролитической обработки можно изготовлять за одну операцию детали сложной формы, с любыми криволинейными обводами, что невозможно при механической обработке.

Более подробно об электролитической обработке металлов сообщается в статье инженера Ю. Филатова на стр. 37 „Техники молодежи", № 3 за 1966 год.

О шаровой молнии

Электрические процессы в газах отличаются большим разнообразием и разной степенью изученности. Но самым таинственным из них является шаровая молния. Загадка шаровой молнии уже несколько столетий привлекает внимание ученых. В природе шаровая молния — редкое и случайное явление, а получить ее в лаборатории не удается.

Чаще всего шаровые молнии появляются после вспышек обыкновенной молнии, но могут появляться и в ясную погоду. Описан случай появления шаровой молнии во время падения сухого наэлектризованного снега.

По характеру поведения шаровые молнии можно разделить на два типа. Молнии первого типа — красные шары диаметром 10—20 *см* — обычно спокойно плавают вблизи земли и исчезают как правило без взрыва. Второй тип — ярко-белые шарики величиной с кулак. Они всегда оседают на каком-либо предмете или катятся по нему. Исчезают со страшным грохотом, производя большие разрушения. Возможен переход первого типа во второй. Время жизии шаровых молний от нескольких секунд до нескольких минут.

4. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Требования программы

Магнитное поле прямого тока и катушки с током. Действие магнитного поля на ток. Индукция магнитного поля. Магнитный поток. Железо в магнитном поле. Принцип устройства амперметра и вольтметра. Электромагнитная индукция. Возникновение электродвижущей силы индукции. Величина электродвижущей силы индукции. Закон Ленца. Явление самоиндукции. Индуктивность. Зависимость индуктивности катушки от числа витков и наличия железного сердечника. Единица индуктивности — генри.

В данном разделе нужно обратить внимание на правило буравчика, правило левой руки и правило правой руки.

На заряд, движущийся в магнитном поле в направлении, перпендикулярном направлению силовых линий, действует сила, перпендикулярная направлению силовых линий и направлению движения заряда. Направление этой силы определяется по правилу левой руки. Левая рука располагается так, чтобы силовые линии входили в ладонь, четыре вытянутых пальца были направлены по движению заряда. При этом отставленный на 90° большой палец указывает направление силы, действующей на положительный заряд. Если в магнитном поле движется в том же направлении отрицательный заряд, то направление силы следует изменить на обратное.

Изучая, как используется в технике взаимодействие тока с магнитным полем, важно хорошо понять принцип действия соответствующих электроизмерительных приборов, микрофона, телефона, громкоговорителя.

Вопросы для самопроверки

1. Что называется напряженностью магнитного поля?

2. Как графически изображается магнитное поле?

3. Что такое силовая линия?

4. Как расположены магнитные силовые линии в случае прямого тока, кругового тока, соленоида?

5. Какое поле называется однородным?

6. Как действует магнитное поле на проводник с током?

7. Как действует магнитное поле на контур с током?

8. Как действует магнитное поле на движущийся электрический заряд?

9. Укажите возможные отклонения катодного луча в однородном магнитном поле, если луч перпендикулярен полю.

10. В чем заключается явление намагничения железа?

11. Что такое индукция магнитного поля и когда она совпадает с напряженностью?

12. Что такое магнитный поток?

13. Какие системы электроизмерительных приборов вам известны? Каков принцип их действия?

14. Как устроены и действуют микрофон, телефон, громкоговоритель?

15. В чем заключается закон электромагнитной индукции Фарадея?

16. Как определяется направление индукционного тока?

17. В чем заключается явление самоиндукции?
18. Каков физический смысл индуктивности?
19. В каких единицах измеряется индуктивность?

Задачи для закрепления

Задачник под редакцией П. А. Знаменского, номера: 1028, 1029, 1031, 1033, 1035, 1038.

Примеры решения задач

Задача 4.1. Самолет летит со скоростью 800 *км/ч*. Вертикальная составляющая земного магнитного поля 0,5 *э*. Найти электродвижущую силу индукции E, возникающую на концах крыльев, размах которых 11 *м*.

Решение. Электродвижущая сила индукции зависит от скорости изменения магнитного потока Φ:

$$E = -10^{-8}\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}.$$

Изменение же магнитного потока зависит от напряженности магнитного поля, размаха крыльев и пути, пройденного самолетом за единицу времени. Но путь за единицу времени численно равен скорости равномерного движения самолета. Таким образом, электродвижущая сила

$$E = -10^{-8}Hlv.$$

Взяв H в эрстедах, размах крыльев l в сантиметрах, а скорость в сантиметрах в секунду, получим:

$$E = -0{,}12 \text{ вольт}.$$

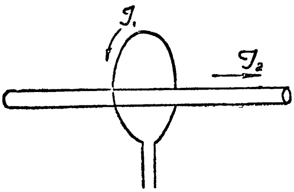


Рис. 52.

Задача 4.2. По кольцевому проводу течет ток I_1, а по прямолинейному проводнику, расположенному на оси кольца, течет ток I_2 (рис. 52). Определить силу взаимодействия этих токов.

Решение. Силовые линии магнитного поля, создаваемые током I_2, представляют собой концентрические окружности. Направление тока I_1 совпадает с одной из таких окружностей, поэтому магнитное поле тока I_2 не будет действовать на ток I_1.

Ток I_2 совпадает по направлению с осевой силовой линией магнитного поля, создаваемого током I_1. Следовательно, на ток I_2 также не будет действовать магнитное поле тока I_1.

Таким образом, сила взаимодействия токов будет равна нулю.

5. ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК

Требования программы

Получение переменного тока. Период, частота, фаза переменного тока. Эффективное напряжение и сила тока.

Выпрямление переменного тока. Генератор постоянного тока. Устройство и действие трансформатора.

Передача и распределение электроэнергии. Успехи электрификации в СССР.

В данном разделе нужно обратить внимание на характеристики переменного тока и его отличие от постоянного тока.

Вращение проволочной рамки в однородном магнитном поле вызывает появление на её концах ЭДС, величина которой меняется по закону синуса:

$$E = E_{м} \sin \omega t.$$

E — мгновенное значение, $E_{м}$ — максимальное значение ЭДС, ω — циклическая частота, t — время.

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

Разделив первое уравнение на сопротивление цепи R, получим, согласно закону Ома, уравнение для силы тока:

$$I = I_{м} \sin \omega t.$$

Значение постоянного тока, выделяющего в проводнике такое же количество теплоты, что и переменный (за одинаковый промежуток времени), называется эффективным значением переменного тока

$$I_{эф} = \frac{I_м}{\sqrt{2}}.$$

Соответственно

$$E_{эф} = \frac{E_м}{\sqrt{2}}, \quad U_{эф} = \frac{U_м}{\sqrt{2}}.$$

Зависимость от времени наделяет переменный ток по сравнению с постоянным новыми свойствами.

Постоянный ток не может проходить через конденсатор, переменный — проходит. При этом переменный ток испытывает сопротивление, зависящее от его частоты и емкости конденсатора.

Постоянный ток, проходя через намотанный витками провод, испытывает сопротивление, определяемое законом Ома. Переменный ток, кроме омического сопротивления, испытывает еще добавочное, зависящее от частоты тока и индуктивности катушки с проводом.

Полное сопротивление переменного тока поэтому зависит от омического, емкостного и индуктивного сопротивлений.

В цепи переменного тока электроны совершают колебательные движения, в цепи постоянного тока движение их одностороннее. Используя свойство двухэлектродной лампы пропускать ток только в одном направлении, можно переменный ток превращать в пульсирующий, „выпрямлять“ его. По характеру включения двухэлектродной лампы в цепь переменного тока различают одно- и двухполупериодные выпрямители. Схемы их нужно запомнить.

И, наконец, свойство переменного тока порождать переменное магнитное поле, которое в свою очередь возбуждает в катушке с проводом переменный ток, лежит в основе действия очень важного устройства — трансформатора. Благодаря трансформатору, можно легко получить переменные токи с различными напряжениями и передавать их в самые отдаленные места без существенных потерь.

Частота переменного тока, принятая в СССР, равна 50 *гц*. Это частота f, ее не надо путать с циклической частотой ω (в данном случае равной 314 *гц*).

Вопросы для самопроверки

1. Рассмотрите схему получения тока в рамке, вращающейся в однородном магнитном поле.
2. По какому закону изменяется ЭДС индукции и ток в рамке?
3. Как изобразить графически зависимость ЭДС и тока от времени?
4. Что такое период и частота переменного тока?
5. Что такое эффективное значение переменного тока и как оно связано с амплитудным?
6. Приборы каких систем могут быть использованы для измерения переменного тока?
7. Каково устройство и принцип действия генератора переменного тока?
8. От чего зависит общее сопротивление в цепи переменного тока?
9. Каково устройство, принцип действия и назначение трансформатора?

Примеры решения задач

Задача 5.1. Неоновая лампа зажигается, когда напряжение между ее электродами становится 90 *в* и гаснет, если напряжение падает ниже 90 *в*. Сколько времени в течение одного полупериода светит лампа, включенная в сеть переменного тока с частотой 50 *гц* и амплитудным значением напряжения 180 *в*?

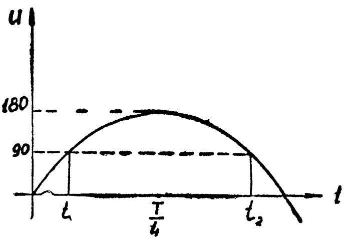


Рис. 53.

Решение. Рассмотрим график зависимости напряжения от времени за один полупериод (рис. 53). Условимся отсчитывать время t от момента, когда напряжение было равно нулю. Обозначим время до момента зажигания неоновой лампы через t_1, а время до ее гашения — через t_2. Примем, что лампа зажигается и гаснет при $U = 90$ *в*. Время работы лампы, очевидно, будет

$$\Delta t = t_2 - t_1,$$

причем

$$0 < \Delta t < \frac{T}{2},$$

где T — период колебания переменного тока.

Напишем аналитическое выражение для синусоидального изменения напряжения со временем:

$$U = U_м \sin \omega t,$$

где $U_м$ — амплитуда напряжения, а $\omega = 2\pi f$.

В моменты времени t_1 и t_2 $U = 90$ *в*, значит, в такие моменты

$$\sin \omega t = \frac{U}{U_м} = \frac{90}{180} = \frac{1}{2},$$

что может быть либо при

$$\omega t_1 = 30°,$$

либо при

$$\omega t_2 = 150°.$$

Из последних двух условий найдем:

$$t_1 = \frac{30°}{2\pi f} = \frac{30°}{360° \cdot 50\ гц} = \frac{1}{600}\ сек,$$

$$t_2 = \frac{150°}{2\pi f} = \frac{150°}{360° \cdot 50\ гц} = \frac{1}{120}\ сек,$$

$$\Delta t = \frac{1}{120} - \frac{1}{600} = \frac{1}{150}\ сек.$$

Таким образом, время свечения неоновой лампы за положительный полупериод примерно 0,0067 *сек*.

Неоновая лампочка вспыхивает и в отрицательный полупериод, и поэтому частота вспышек неоновой лампочки получается вдвое больше частоты самого переменного тока.

6. ТОК В ВАКУУМЕ

Требования программы

Электронные явления в вакууме. Явление термоэлектронной эмиссии. Электронные лампы диод и триод, их устройство и действие. Использование диода для выпрямления переменного тока. Электронно-лучевая трубка.

Вопросы для самопроверки

1. Каково устройство двухэлектродной электронной лампы?
2. Каково устройство трехэлектродной электронной лампы?
3. Как происходит выпрямление переменного тока по однополупериодной схеме?
4. Как происходит выпрямление переменного тока по двухполупериодной схеме?
6. В межполюсном пространстве электромагнита, по обмотке которого течет переменный ток, помещен катодный луч. Луч перпендикулярен магнитному полю. Опишите поведение луча.

7. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ

Требования программы

Электромагнитные колебания и волны. Колебательный контур. Превращение энергии в колебательном контуре. Зависимость периода колебаний в контуре от индуктивности и емкости (без математического вывода). Электрический резонанс. Получение незатухающих колебаний. Электронная лампа как генератор.

Открытый колебательный контур. Излучение и прием электромагнитных волн. Скорость распространения электромагнитных волн. Шкала электромагнитных волн.

Изобретение радио А. С. Поповым.

При изучении этого раздела следует обратить внимание на процесс превращения энергии в колебательном контуре и на явления электрического резонанса. Надо хорошо уяснить процессы, происходящие в замкнутом колебательном контуре, в открытом колебательном контуре, и знать, где они применяются. Необходимо ясно представлять принцип работы всех схем, а сами схемы — запомнить.

Вопросы для самопроверки

1. Что такое колебательный контур?
2. Какие процессы происходят в колебательном контуре?
3. Что такое период колебания и от каких элементов контура он зависит?
4. Какие колебания называются вынужденными?
5. В чем заключается явление резонанса?
6. Что такое электромагнитная волна?
7. Как происходит излучение и прием электромагнитных волн?
8. Где применяется трехэлектродная электронная лампа?
9. Начертите по памяти: а) схему, иллюстрирующую процессы превращения энергии в колебательном контуре; б) схему генератора незатухающих электромагнитных колебаний; в) схему установки для получения модулированных колебаний; г) схему, в которой электронная лампа выполняет роль детектора; д) схему усиления электромагнитных колебаний; е) блок-схему радиоприемника.

Задачи для закрепления

Задачник под редакцией П. А. Знаменского, номера: 1073, 1074, 1076, 1077, 1079, 1081, 1083, 1085.

Примеры решения задач

Задача 7.1. Собственную частоту колебательного контура можно определить по формуле

$$f=\frac{K}{2\pi\sqrt{LC}}. \tag{6.20}$$

Найти, какую величину должен иметь коэффициент K в этой формуле, если индуктивность дана в *мкгн*, емкость в *пф*, а частота должна быть выражена в *гц*?

Решение. Если индуктивность выражена в генри, а емкость в фарадах, то, согласно формуле Томсона,

$$f=\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \tag{6.21}$$

Напишем соотношения между единицами индуктивности и емкости. 1 *гн* $=10^6$ *мкгн*, следовательно,

$$\begin{bmatrix}\text{индуктивность,}\\ \text{выраженная в}\\ \text{генри (малое}\\ \text{число)}\end{bmatrix}=10^{-6}\cdot\begin{bmatrix}\text{индуктивность,}\\ \text{выраженная в}\\ \text{микрогенри.}\\ \text{(большое число)}\end{bmatrix}$$

Сокращенно это запишем так:

$$L_{(в\ гн)}=10^{-6}L_{(в\ мкгн)}.$$

Аналогично

$$C_{(в\ ф)}=10^{-12}\cdot C_{(в\ пф)}.$$

Поскольку и в формуле (6.20) и в формуле (6.21) частота должна быть выражена в герцах,

$$\frac{K}{2\pi\sqrt{L_{(в\ мкгн)}\cdot C_{(в\ пф)}}}=\frac{1}{2\pi\sqrt{L_{(в\ гн)}\cdot C_{(в\ ф)}}},$$

откуда

$$K=\sqrt{\frac{L_{(в\ мкгн)}\cdot C_{(в\ пф)}}{L_{(в\ гн)}\cdot C_{(в\ ф)}}}=$$

$$=\sqrt{\frac{L_{(в\ мкгн)}\cdot C_{(в\ пф)}}{10^{-6}L_{(в\ мкгн)}\cdot 10^{-12}C_{(в\ пф)}}}=\frac{1}{\sqrt{10^{-18}}}=10^9.$$

Итак, формула (6.20) будет иметь вид

$$f=\frac{10^9}{2\pi\sqrt{LC}}.$$

Задача 7.2. Радиолокатор посылает 1000 импульсов в секунду. Определить наибольшую дальность действия этого радиолокатора.

Решение. Сигнал, который посылает радиолокатор, должен достичь объекта, отразиться от него и вернуться на приемную станцию радиолокатора. Радиолокатор не должен посылать следующий сигнал, пока не будет принят посланный перед этим. Следовательно, максимально большой путь s сигнал пройдет туда и обратно за время t со скоростью распространения электромагнитных волн c:

$$2s = ct.$$

Время t есть период посылки импульсов, он равен

$$t = \frac{1}{1000}\ \textit{сек}.$$

Значит,

$$s = \frac{300\,000\,\frac{\textit{км}}{\textit{сек}} \cdot \frac{1}{1000}\,\textit{сек}}{2} = 150\ \textit{км}.$$

Очевидно, чем меньше сигналов посылает радиолокатор в 1 *сек*, тем больше его дальность действия.

VII. ОПТИКА

1. ФОТОМЕТРИЯ

Требования программы

Источник света. Прямолинейность распространения света. Скорость света. Определение скорости света по способу Майкельсона.

Световой поток. Сила света. Освещенность.

Аналогично электростатике, оптика использует понятие точечного источника света. Это — источник, излучающий свет по всем направлениям равномерно, размерами которого можно пренебречь по сравнению с расстоянием, на котором оценивается его действие.

Количество энергии, излучаемой источником света по всем направлениям в единицу времени, называется полным световым потоком Φ источника.

$$\Phi = \frac{L}{t},$$

где L — энергия световых лучей, t — время.

Отнеся световой поток к величине телесного угла, в котором этот поток распространяется, получим силу света J источника:

$$I = \frac{\Phi}{\omega}.$$

Отношение же светового потока к величине площади поверхности, на которую он падает, дает освещенность:

$$E = \frac{\Phi}{S}.$$

Освещенность и сила света связаны между собой соотношением:

$$E = \frac{I}{r^2} \cos \alpha.$$

Единицей силы света является свеча (*св*). Световой поток измеряется в люменах (*лм*), освещенность — в люксах (*лк*).

Вопросы для самопроверки

1. Что называется точечным источником света?
2. Чем доказывается прямолинейное распространение света?
3. Что называется полным световым потоком источника света?
4. Что называется силой света?
5. Что называется освещенностью?
6. Что принимают за единицу силы света?
7. Что служит единицей светового потока?
8. Какова единица освещенности?
9. В чем состоит первый закон освещенности?
10. В чем состоит второй закон освещенности?
11. Как производится сравнение силы света двух источников?

Задачи для закрепления

Задачник под редакцией П. А. Знаменского, номера: 1095, 1096, 1101, 1105, 1107, 1108, 1109, 1110, 1113, 1115, 1117, 1121, 1126, 1127, 1129.

Примеры решения задач

Задача 1.1. На какой высоте над столом нужно подвесить электрическую лампу с силой света 345 *св*, чтобы освещенность стола под лампой была 25 *лк*?

Решение. Формула освещенности для данного случая будет:

$$E = \frac{I}{h^2},$$

где I — сила света лампы, h — высота в метрах. Отсюда

$$h=\sqrt{\frac{I}{E}}\simeq 3{,}9\ м.$$

Задача 1.2. При определении силы света I_x неизвестного источника фотометрическим способом оказалось, что сила света I_x очень велика и ее нельзя сравнить с силой света I_0 эталонного источника. Нельзя ли определить I_x по силе света I другого неизвестного источника, такого, что $I_0<I<I_x$?

Решение. Сначала надо определить силу света I второго источника, сравнив ее с эталонной на имеющемся фотометре. Предположим, что при равенстве освещенностей обоих полей фотометра эталонный источник находился на расстоянии r_1 от объектива фотометра, а второй неизвестный источник — на расстоянии r_2.

После этого вместо эталонного источника на оптическую скамью нужно поместить второй неизвестный источник и сравнить его силу света I с самым сильным источником I_x. Пусть расстояние от I до объектива фотометра будет r_3, а от I_x — r_4. Очевидно, $r_4>r_3>r_2>r_1$.

Для первого случая

$$\frac{I_0}{r_1^2}=\frac{I}{r_2^2},$$

для второго случая

$$\frac{I}{r_3^2}=\frac{I_x}{r_4^2}.$$

Из обоих равенств находим:

$$I_x=\frac{r_2^2\cdot r_4^2}{r_1^2\cdot r_3^2}I_0.$$

2. ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА

Требования программы

Законы отражения света. Построение изображения в плоском зеркале. Рассеянное отражение. Построение изображений в сферических зеркалах. Фокус зеркала. Прожектор.

Законы преломления света. Показатель преломления. Ход лучей в призме и плоскопараллельной пластине. Полное внутреннее отражение. Предельный угол.

Собирающие и рассеивающие линзы; формула линзы (без вывода ее). Построение изображения в линзах. Оптическая сила линзы.

Проекционный аппарат. Фотоаппарат. Лупа. Ход лучей в этих приборах.

В однородной среде свет распространяется прямолинейно. На границе двух сред свет частично отражается, частично преломляется, причем угол отражения равен углу падения

$$\beta = \alpha,$$

и отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\gamma} = n_{\text{отн.}}.$$

Относительный показатель преломления $n_{\text{отн.}}$ показывает, во сколько раз скорость света во второй среде меньше, чем скорость света в первой:

$$n_{\text{отн.}} = \frac{c_1}{c_2}.$$

Из $c_1 = c_0/n_1$ и $c_2 = c_0/n_2$, где n_1 и n_2 — абсолютные показатели преломления сред, вытекает:

$$n_{\text{отн.}} = \frac{c_0}{n_1} : \frac{c_0}{n_2} = \frac{n_2}{n_1}.$$

При $n_2 > n_1$ $\sin\alpha > \sin\gamma$ и угол падения α больше угла преломления γ.

При $n_2 < n_1$, наоборот, $\gamma > \alpha$, так что при постепенном увеличении α угол преломления γ достигает наибольшего возможного значения: 90°. При дальнейшем увеличении угла падения преломления уже не будет — наступит полное внутреннее отражение.

Угол падения, соответствующий максимальному углу преломления, называется углом полного внутреннего отражения.

В пластинке с параллельными гранями и призме свет преломляется дважды.

Точечный источник света дает расходящийся пучок лучей. Оптическая система, помещенная на пути этих лучей, меняет их направление, так что выходящий из нее пучок может быть: 1) сходящимся, 2) расходящимся, 3) параллельным.

Точка пересечения выходящих лучей является изображением источника. В первом случае она получится при продолжении лучей в направлении их распространения (действительное изображение). Во втором случае точка лежит на их продолжении в обратном направлении (мнимое изображение). В третьем случае изображения вообще нет.

Любые два луча из выходящего пучка полностью определяют положение изображения, поэтому для его построения необходимо знать поведение хотя бы двух лучей при их прохождении через оптическую систему.

Фокусное расстояние F вычисляется для линз по формуле

$$\frac{1}{F} = (n_{\text{отн.}} - 1)\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)$$

и по формуле:

$$F = -0{,}5R$$

для зеркал, причем радиус R считается положительным для выпуклой и отрицательным для вогнутой поверхности ($R = \infty$ для плоской поверхности). Отсюда следует, что у выпуклого зеркала и рассеивающей линзы фокусное расстояние отрицательное (фокус мнимый, т. е. лучи, падающие на систему параллельно, после выхода из нее расходятся; в фокусе же собираются не сами лучи, а их продолжения в обратную сторону). У вогнутого зеркала и собирательной линзы фокусное расстояние положительное (фокус действительный). Плоское зеркало имеет фокус в бесконечности.

Если известно F и расстояние от источника до оптической системы d, можно определить расстояние от системы до изображения f по формуле:

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F},$$

Для плоского зеркала $F = \infty$, $1/F = 0$ и $f = -d$ (изображение мнимое, по другую сторону зеркала).

Оказывается, что $f = Fd/(d - F)$ отрицательно для выпуклого зеркала и рассеивающей линзы и изображения у этих систем тоже мнимые.

Для построения изображения всего предмета его надо „разложить“ на отдельные точки, получить их изображения, а затем эти изображения „сложить“.

Оптические системы, состоящие из двух или более линз и зеркал, называются сложными. Построения для них делаются последовательно: сначала строится первое изображение предмета от первой линзы, потом изображение первого изображения, даваемое второй линзой и т. д. В том же порядке производятся вычисления.

Вопросы для самопроверки

1. Что такое световой луч?
2. Каковы законы отражения света?
3. Сформулируйте правило построения изображения в плоском зеркале.
4. Каковы законы преломления света?
5. Что такое полное внутреннее отражение?
6. Что такое оптический центр и главная оптическая ось сферического зеркала?
7. Что такое фокус зеркала?
8. Чему равно фокусное расстояние сферического зеркала?
9. При помощи каких лучей можно построить изображение светящейся точки, даваемое сферическим зеркалом?
10. Что называется фокусом и фокусным расстоянием линзы?
11. Как строится изображение светящейся точки для линзы?
12. Когда изображение, даваемое двояковыпуклой линзой, будет мнимым?
13. Напишите формулу линзы и поясните ее.
14. Начертите по памяти ход лучей в проекционном аппарате, фотоаппарате, лупе, микроскопе, телескопе.
15. Почему очки улучшают зрение?

Задачи для закрепления

Задачник под редакцией П. А. Знаменского, номера: 1131, 1138, 1139, 1141, 1144, 1145, 1147, 1148, 1152, 1153, 1160, 1162, 1164, 1169, 1176, 1179, 1189, 1190, 1191, 1192, 1195, 1204, 1206, 1207, 1210, 1214, 1215, 1216, 1217, 1222, 1223, 1225, 1228, 1232, 1234, 1242, 1249, 1259, 1263.

Примеры решения задач

Задача 2.1. Точечный источник света, помещенный на расстоянии r от плоского экрана, создает в центре экрана освещенность E. Как изменится освещенность в центре экрана, если по другую сторону источника света на расстоянии $\frac{1}{2}r$ поместить вогнутое зеркало радиусом r? Взаимное расположение предметов показано на рис. 54.

Решение. Освещенность поверхности точечным источником света обратно пропорциональна квадрату расстояния этой поверхности от источника света. Экран $Э$ находится на расстоянии r от источника света S, а зеркало на расстоянии $\frac{1}{2}r$, поэтому отношение освещенности экрана и освещенности зеркала

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\left(\frac{1}{2}r\right)^3}{r^2} = \frac{1}{4}.$$

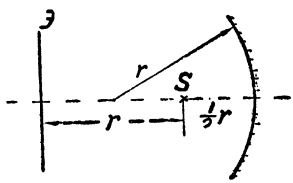


Рис. 54.

Центр зеркала будет освещен в 4 раза больше, чем центр экрана:

$$E_2 = 4E_1.$$

Источник света S находится в фокусе вогнутого зеркала, поэтому лучи после отражения от зеркала пойдут параллельным пучком и упадут на экран, увеличив его освещенность на $4E_1$. Общая освещенность центра экрана станет $5E_1$.

Задача 2.2. Какую величину должен иметь показатель преломления материала, из которого изготовлена равнобедренная призма с преломляющим углом 90°, чтобы эту призму можно было использовать как призму полного внутреннего отражения?

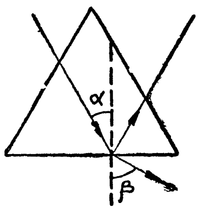


Рис. 55.

Решение. Показатель преломления материала призмы

$$n = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}.$$

Для предельного угла падения $\alpha_{\text{пр}}$ угол преломления β должен быть не меньше 90°. Полагая угол $\beta = 90°$, получим

$$\sin \alpha_{\text{пр}} = \frac{1}{n}$$

или, точнее,

$$\sin \alpha_{\text{пр}} > \frac{1}{n}.$$

Из последнего условия

$$n > \frac{1}{\sin \alpha_{\text{пр}}} \quad \text{или} \quad n > \frac{1}{0{,}707},$$

т. е. показатель преломления должен быть не меньше 1,4.

Задача 2.3. На рассеивающую линзу падает цилиндрический пучок света параллельно главной оптической оси (рис. 56). Диаметр пучка 5 *см*. За линзой на рас-

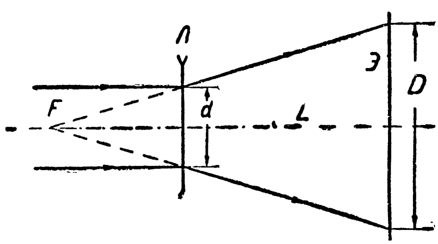


Рис. 56.

стоянии $L = 20$ *см* установлен экран. Диаметр пучка на экране 15 *см*. Определить фокусное расстояние линзы.

Решение. Обозначим диаметр падающего пучка через d, а диаметр пучка на экране через D. Из рис. 56, рассматривая подобные треугольники, найдем:

$$\frac{D}{d}=\frac{L+F}{F},$$

где L — расстояние от линзы до экрана, а F — фокусное расстояние. Из этого соотношения

$$F=\frac{L\cdot d}{D-d}=10\ см.$$

Задача 2.4. Светящаяся точка находится от экрана на расстоянии $L=1$ *м*. Помещая между экраном и светящейся точкой собирающую линзу и перемещая ее от светящейся точки к экрану (рис. 57), можно получить на экране два изображения точки, если $L>4F$. Одно изображение будет увеличенное, другое уменьшенное. Расстояние перемещения линзы, при котором получаются изображения, 20 *см*. Определить фокусное расстояние линзы.

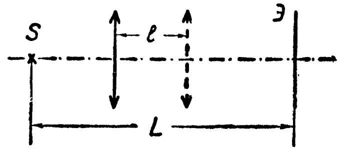


Рис. 57.

Решение. Пользуясь основной формулой для собирающей линзы, получим

$$\frac{1}{\frac{L}{2}+\frac{l}{2}}+\frac{1}{\frac{L}{2}-\frac{l}{2}}=\frac{1}{F},$$

из которой

$$F=\frac{L^2-l^2}{4L}=24\ см.$$

Задача 2.5. Тонкая собирающая линза закрыта непрозрачной пластинкой ровно наполовину (рис. 58). Какой вид будет иметь изображение предмета AB в таких условиях?

Решение. Обычно для построения изображения в линзах или сферических зеркалах пользуются двумя лучами: параллельным главной оптической оси (он после преломления проходит через фокус) и проходящим через центр линзы (он сохраняет свое направление). При этом часто упускают из вида, что из каждой точки предмета можно провести бесконечное число

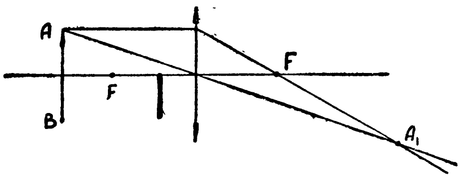


Рис. 58.

лучей, которые соберутся в соответствующей точке изображения. В частности, все лучи, исходящие из точки B и падающие на закрытую часть линзы, соберутся в точке B_1 (рис. 59). Непрозрачная пластинка задержит лучи, падающие на нижнюю половину, но и в точке A_1 соберутся лучи, прошедшие только через верхнюю половину линзы. Следовательно, изображение предмета как по форме, так и по месту положения не будет отличаться от изображения, которое получилось бы без пластинки. Разница будет только в интенсивности изображения, так как через полузакрытую линзу пройдет вдвое меньше световой энергии.

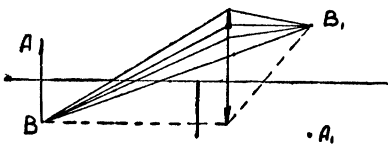


Рис. 59.

Задача 2.6. Две собирающие линзы с одинаковыми фокусными расстояниями $F = 10$ *см* расположены одна в фокусе другой. На расстоянии $a = 20$ *см* от одной из линз на оптической оси находится светящаяся точка. Где будет изображение точки?

Решение. Построим луч, идущий из точки S в направлении точки A (рис. 60). Для этого применим метод побочных оптических осей. Первую проведем через центр линзы 1 параллельно лучу

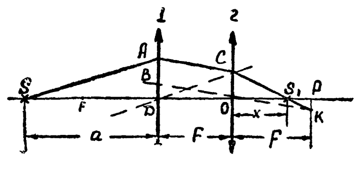


Рис. 60.

SA — это будет прямая DC. Луч SA должен пересечь эту побочную ось в фокальной плоскости первой линзы, т. е. в точке C. Следовательно, ход луча между линзами будет изображен прямой AC. Вторую побочную ось проведем через центр линзы 2 параллельно AC. Луч пересечет ее тоже в фокальной плоскости — это позволяет найти пересечение луча с главной оптической осью, т. е. изображение S_1 точки S.

Рассматривая подобные треугольники, получим

$$\frac{x}{F} = \frac{OC}{OC + PK},$$

$$\frac{F}{a} = \frac{OC}{AD} = \frac{OC}{AB + PK} = \frac{OC}{OC + PK}.$$

Приравнивая левые части уравнений

$$\frac{x}{F} = \frac{F}{a},$$

найдем, что

$$x = \frac{F^2}{a} = 5 \text{ см}.$$

Задача 2.7. Две одинаковые тонкие собирающие линзы, сложенные вплотную, дают на экране изображение лампочки, увеличенное в 3 раза. Расстояние между лампочкой и экраном $l = 80$ *см*. Определить оптическую силу каждой линзы.

Решение. Оптическая сила D системы равна сумме оптических сил D_1 отдельных линз

$$D = 2D_1$$

или

$$\frac{1}{F} = \frac{2}{F_1},$$

где F — фокусное расстояние системы линз,

F_1 — фокусное расстояние одной линзы.

Фокусное расстояние системы линз находим по обычной формуле для собирающей линзы:

$$\frac{1}{F} = \frac{2}{F_1} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{f + d}{df}.$$

По условию задачи

$$\text{увеличение } \frac{f}{d} = k = 3$$

и

$$d+f=l.$$

Решая полученную систему уравнений, найдем фокусное расстояние:

$$F_1=\frac{2lk}{(1+k)^2}=0{,}3\ \textit{м}.$$

Оптическая сила каждой линзы

$$D_1=\frac{1}{F_1}\approx 3{,}3\ \textit{диоптрии}.$$

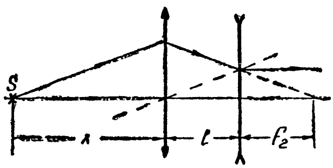


Рис. 61.

Задача 2.8. Две равнофокусные линзы, выпуклая и вогнутая (фокусное расстояние $F=80$ *см*), находятся одна от другой на расстоянии 80 *см*. Где следует поместить светящуюся точку перед выпуклой линзой, чтобы лучи, пройдя через обе линзы, направились параллельным пучком.

Решение. Оптическая система изображена на рис. 61. Запишем формулу для выпуклой линзы

$$\frac{1}{l+F_2}+\frac{1}{x}=\frac{1}{F_1}.$$

Из чертежа видно, что по абсолютной величине $F_2=F_1=F$, поэтому можно записать, что

$$\frac{1}{l+F}+\frac{1}{x}=\frac{1}{F},$$

откуда

$$x=\frac{(l+F)F}{l}=144\ \textit{см}.$$

Задача 2.9. Какие фокусные расстояния должны иметь линзы, чтобы зрительная труба Галилея с 12-кратным увеличением имела длину 22 *см*?

Решение. Известно, что зрительная труба Галилея имеет две линзы: окулярная линза должна быть рассеивающей, а объективная собирающей. Длина трубы должна быть равна сумме фокусных расстояний обеих линз, следовательно,

$$l=f_1-f_2, \tag{7.1}$$

где f_1 — фокусное расстояние объектива,
а f_2 — фокусное расстояние окуляра.

Увеличение трубы определяется отношением фокусного расстояния объектива к фокусному расстоянию окуляра

$$k = \frac{f_1}{f_2}. \tag{7.2}$$

Из соотношений (7.1) и (7.2) можно определить f_1 и f_2.

$$f_2 = \frac{l}{k-1} = 2\ см,$$

$$f_1 = \frac{kl}{k-1} = 24\ см.$$

Задача 2.10. Микроскоп, окуляр которого дает 7-кратное увеличение, увеличивает в 140 раз. Какое увеличение будет иметь микроскоп после замены окуляра линзой с фокусным расстоянием в 1 *см*?

Решение. Увеличение микроскопа равно произведению увеличений объектива и окуляра. Окулярная линза микроскопа работает как лупа, и для определения увеличения окуляра можно пользоваться формулой увеличения лупы.

До замены увеличение k_0 микроскопа было

$$k_0 = k_1 k_2, \tag{7.3}$$

где k_1 — увеличение объектива, а k_2 — увеличение окуляра. После замены увеличение k микроскопа стало

$$k = k_1 k_3, \tag{7.4}$$

где k_3 — увеличение лупы. Оно равно

$$k_3 = \frac{D}{f}. \tag{7.5}$$

Постоянная D — это расстояние наилучшего зрения, равное 25 *см*, f — фокусное расстояние.

Из совместного решения равенств (7.3) — (7.5) получаем:

$$k = \frac{k_0}{k_2} \cdot \frac{D}{f} = \frac{140 \cdot 25}{7 \cdot 1} = 500.$$

3. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СВЕТА С ВЕЩЕСТВОМ

Требования программы

Разложение белого света призмой. Спектр. Спектроскоп. Невидимые лучи. Спектры испускания. Спектры поглощения. Понятие о спектральном анализе.

Понятие о волновой и квантовой природе света.

Фотоэлектрический эффект. Работа А. Г. Столетова по фотоэлектрическому эффекту. Фотоэлементы и их применение.

Свет — это электромагнитные волны. Подтверждением этого служат дифракция и интерференция.

Скорость света в пустоте $c_0 = 300\,000$ *км/сек*, а в любой другой среде в n раз меньше (n — абсолютный показатель преломления), так что длина волны в среде с показателем преломления n

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = cT = \frac{c_0}{n} T = \frac{\lambda_0}{n},$$

где λ_0 — длина волны в пустоте.

Явление дисперсии показывает, что, во-первых, белый свет — это смесь монохроматических (одноцветных) волн, различающихся по частоте; во-вторых, показатель преломления некоторых сред зависит от частоты световых колебаний (в стекле, например, сильнее всего преломляются фиолетовые лучи и слабее всего красные).

Необходимо подчеркнуть, что цвет определяется именно частотой колебаний, а не длиной волны. Длина волны λ зависит от среды, в которой распространяются колебания, а цвет и частота — нет.

Фотоэффект — это выбивание электронов из металла падающим на него светом.

Для каждого металла существует „красная граница“ фотоэффекта: если облучать данный металл светом, частота которого меньше, чем частота красной границы, то электроны не вылетают.

Энергия и скорость выбитых электронов зависят только от частоты падающего света. Эти особенности фотоэффекта можно объяснить, только опираясь на представление о прерывности электромагнитной волны, и поэтому фотоэффект является одним из главных доказательств существования фотонов.

Чтобы вырвать электроны из металла, надо сообщить ему определенную энергию, равную работе выхода A. Если частота падающего света слишком мала, то энергия фотона $h\nu$ меньше работы выхода, и электрон из металла вырван не будет. Следовательно, фотоэффект возможен, если энергия одного фотона падающего света не меньше работы выхода:

$$h\nu \geqslant A.$$

Красной границе соответствует энергия фотона $h\nu = A$ и частота колебаний

$$\nu_{гр.} = \frac{A}{h}.$$

При частоте больше граничной энергия фотона расходуется не только на работу выхода электрона из металла, но и на сообщение ему кинетической энергии, так что

$$h\nu = A + \frac{mv^2}{2}.$$

Отсюда видно, что энергия выбитого электрона и его скорость должны зависеть от частоты света ν.

Вопросы для самопроверки

1. Что такое интерференция волн?
2. Что такое дифракция волн?
3. Что такое дисперсия света?
4. Как отличаются показатели преломления стекла для световых лучей разного цвета?
5. Можно ли из цветных лучей получить белый свет?
6. Как устроен спектроскоп?
7. В чем отличие спектров испускания от спектров поглощения?
8. Как можно обнаружить ультрафиолетовые и инфракрасные лучи?
9. Каковы свойства рентгеновских лучей?

10. Что общего между светом и радиоволнами?
11. В чем заключается закон Столетова для фотоэффекта?
12. Какова энергия одного кванта света?
13. Какую размерность имеет постоянная Планка?
14. Приведите примеры применения фотоэлемента.

Задачи для закрепления

Задачник под редакцией П. А. Знаменского, номера: 1267, 1271, 1272, 1273, 1279, 1298, 1300, 1306, 1317.

VIII. СТРОЕНИЕ АТОМА

Требования программы

Явления, подтверждающие сложное строение атома. Способы наблюдения частиц.

Строение атома — электронная оболочка и ядро. Излучение и поглощение энергии атомом.

Составные части ядра атома — протоны и нейтроны.

Деление ядер урана. Цепная реакция. Выделение энергии при ядерном распаде.

Атом состоит из ядра и движущихся вокруг него электронов. Двигаясь по определенным орбитам, электроны не излучают и не поглощают свет. В таком стационарном состоянии все электроны и атом в целом имеют определенную энергию.

Переход электрона с одной стационарной орбиты на другую сопровождается скачкообразным изменением энергии на величину $E_2 - E_1$, где E_1 и E_2 — энергии электрона (атома) в исходном и конечном состояниях. Близким к ядру орбитам соответствует меньшая энергия и большая разность энергий между соседними орбитами. Энергию $E_2 - E_1$ уносит или приносит квант света — фотон, который излучается или поглощается атомом в зависимости от того, куда перескакивает электрон: на более близкую или более далекую от ядра орбиту. Энергия фотона равна $h\nu$, где $h = 6{,}62 \times 10^{-27}$ *эрг/сек* (постоянная Планка). Поэтому каждому электронному переходу соответствует своя частота и своя спектральная линия. Состоящие из таких линий спектры различных элементов называются линейчатыми и резко отличаются друг от друга, поскольку у каждого элемента свой набор стационарных состояний электронов в атоме, которому соответствует определенная комбинация электронных переходов. По той же причине для одного и того же вещества спектр поглощения и спектр испускания тождественны.

В случае видимого света переходы электроном совершаются между дальними от ядра орбитами. Разность энергий $E_2 - E_1$ для дальних орбит мала, поэтому излучения или поглощения отличаются малой частотой (большой длиной волны).

В рентгеновской трубке при резком торможении катодных лучей об антикатод возникает излучение очень короткой длины волны. Оказывается, быстрые электроны катодных лучей выбивают из атомов антикатода электроны с внутренних, близких к ядру орбит. На освободившееся место переходят электроны с соседних орбит, лежащих несколько дальше от ядра. $E_2 - E_1$ для внутренних орбит велика, что соответствует высокой частоте и малой длине волны излучения, поскольку $E_2 - E_1 = h\nu$.

Вопросы для самопроверки

1. Какими опытами доказывается сложность строения атома?
2. Дайте схему планетарной модели атомов водорода и гелия.
3. Как происходит излучение и поглощение энергии в атоме?
4. Скольким эргам соответствует энергия в 1 *электрон-вольт*?
5. Какие частицы микромира вы знаете?
6. Приведите примеры использования изотопов.
7. Какова схема цепной реакции ядерного распада урана?
8. По какой формуле подсчитывается энергия, выделившаяся при ядерном распаде?

Задачи для закрепления

Задачник под редакцией П. А. Знаменского, номера: 1318, 1320, 1323, 1324, 1325, 1326.

Примеры решения задач

Задача 8.1. Какую длину волны имеет квант света с энергией 10 *эв*?

Решение. Энергия кванта равна

$$E = h\nu.$$

Скорость света

$$c = \lambda\nu.$$

Подставим $\nu = c/\lambda$ в первую формулу и найдем, что

$$\lambda = \frac{ch}{E}$$

$$1\ \textit{эв} = 1{,}6\ 10^{-12}\ \textit{эрг} = 1{,}6\ 10^{-19}\ \textit{дж}.$$

$$h = 6{,}62\ 10^{-27}\ \textit{эрг}\cdot\textit{сек} = 6{,}62\ 10^{-34}\ \textit{дж}\cdot\textit{сек}.$$

$$c = 3\cdot 10^{8}\ \textit{м/сек}.$$

После вычислений получаем:

$$\lambda = 1{,}24\ 10^{-7}\ \textit{м}.$$

Задача 8.2. Заряженная частица после прохождения разности потенциалов в 1 *кв* приобретает энергию в 8000 *эв*. Определить заряд частицы, выразив его через заряд электрона.

Решение. Энергия частицы $E = qU$, где q — заряд частицы.

$$q = \frac{E}{U} = \frac{8000\ \textit{эв}}{1000\ \textit{в}} = 8\ \textit{эв}.$$

Но заряд любой частицы может отличаться от заряда электрона только в целое число раз: $q = ne$. Следовательно, в нашем случае $q = 8e$ $(e = 16\cdot 10^{-20} k)$.

Дополнительный материал

Новые атомы и античастицы

Между 1937 и 1940 гг. все пустые клеточки в периодической системе Менделеева были заполнены. Началась эра искусственных элементов. Первым был получен технеций, за ним последовали прометий, астатин и другие. В 1939 г. открыли трансураны — элементы, очень важные для цепных реакций.

С созданием больших ускорителей стало возможным систематически изучать частицы высоких энергий: протоны, мезоны и т. п. Связанные с ними проблемы очень глубоко затрагивают строение ядра атома, в частности — природу ядерных сил.

Физика высоких энергий открыла совершенно новые, необычные атомы. В качестве примера можно привести позитроний, который состоит из одного позитрона и одного электрона. Позитроний похож на атом водорода, но существует очень короткое время. Получены также мезоатомы, в которых вместо внешних электронов пи- или мю-мезоны. Такие атомы тоже очень неустойчивы и, едва успев образоваться, моментально распадаются.

В 1955 г. наступила пора открытия античастиц. Первыми были получены антипротоны. К настоящему времени известны и другие античастицы, например антинейтроны. Совсем недавно получены первые тяжелые антиядра. Антинейтроны, антипротоны и позитроны могут образовывать антиатомы, полностью аналогичные обычным атомам. Антиматерия должна быть так же устойчива, как и обычная, пока они не соприкасаются. Соприкосновение приводит к аннигиляции (взаимному уничтожению), которая сопровождается выделением громадных количеств энергии.

Возможно, что в космосе существуют скопления антиматерии и даже целые миры из нее. Со временем наука это узнает.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Владимир Николаевич Подымов

ПОСОБИЕ ПО ЭЛЕМЕНТАРНОЙ ФИЗИКЕ

Редактор *Н. Н. Мичурина*
Технический редактор *Л. И. Антралова*
Корректор *Е. П. Храмова*

Сдано в набор 22/V-1967 г. Подписано к печати 3/X-1967 г. ПФ 03271.
Формат бумаги $84\times108^1/_{32}$. Печатн. листов 4,875 (8,19). Уч.-изд. л. 7,53.
Заказ В-257. Тираж 150 000 экз. Цена 23 коп.

Издательство Казанского университета. Казань, ул. Ленина, 4/5.
Типография „Татполиграф" Управления по печати при Совете Министров ТАССР.
Казань, ул. Миславского, 9

ДЛЯ ЗАМЕТОК

ДЛЯ ЗАМЕТОК

ДЛЯ ЗАМЕТОК

ЗАМЕЧЕННЫЕ ОПЕЧАТКИ

Строка	Страница	Напечатано	Следует читать
11	8—9, 11 сверху	его условием покоя	условием его покоя
28	7 строка снизу	$m = \dfrac{m_0}{\sqrt{1 + \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$	$m = \dfrac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$
57	4 строка сверху	$\dfrac{mv^2}{2} = mg(l-h) = mgl$	$\dfrac{mv^2}{2} + mg(l-h) = mgl$

Заказ В-257. В. Н. Подымов. Пособие по элементарной физике.

Цена 24 коп.

ИЗДАТЕЛЬСТВО
КАЗАНСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА