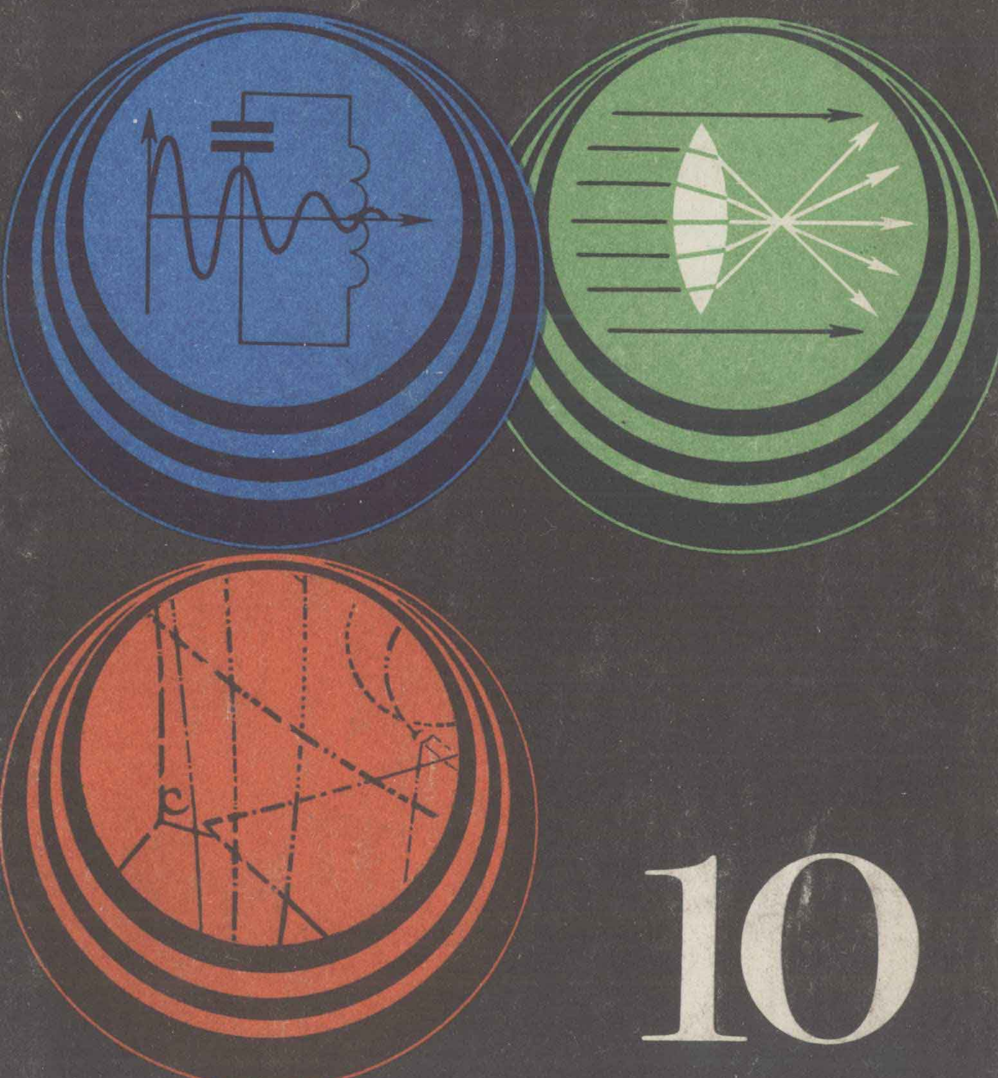
Г. Я. МЯКИШЕВ, Б. Б. БУХОВЦЕВ

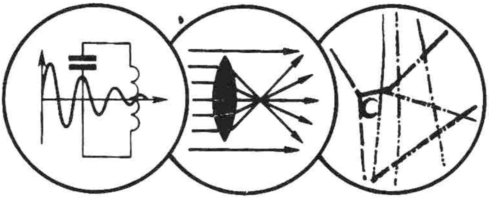
ФИЗИКА



10

Г. Я. МЯКИШЕВ
Б.Б. БУХОВЦЕВ

ФИЗИКА



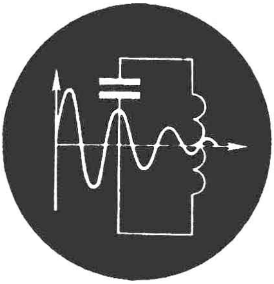
УЧЕБНИК ДЛЯ 10 КЛАССА СРЕДНЕЙ ШКОЛЫ

Утвержден Министерством просвещения СССР

ИЗДАНИЕ ТРЕТЬЕ

МОСКВА
«ПРОСВЕЩЕНИЕ» 1979

М $\frac{60601-158}{103(03)-79}$ инф. письмо



КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

ВВЕДЕНИЕ

До сих пор при изучении физики мы придерживались определенной последовательности. В VIII классе рассматривалось механическое движение: изменение положения тел (или их частей) друг относительно друга в пространстве с течением времени. В IX классе, изучая термодинамику и молекулярную физику, мы познакомились с тепловыми процессами. Вторая половина курса физики IX класса была посвящена электромагнитным явлениям. Но изучение электродинамики не было закончено. Нужно еще познакомиться с такими важными процессами, как переменный ток, радиоволны (электромагнитные волны) и т. д. Однако если вы перелистаете несколько страниц в начале учебника, то увидите, что курс физики для десятого класса опять начинается с механики — с рассмотрения механических колебаний. Лишь после этого продолжается не законченное в IX классе изучение электродинамики. Дело здесь вот в чем.

В восьмом классе наряду с общими законами механики много времени было уделено различным частным видам механического движения: движению с постоянным ускорением и движению по окружности. Но при этом ничего не было сказано о таких важнейших видах механического движения, как колебания и волны. Разумеется, о них не просто забыли рассказать в свое время. Имеются веские основания для того, чтобы колебания и волны различной физической природы (механические и электромагнитные) рассматривать совместно.

Казалось бы, что общего между колебаниями маятника и разрядом конденсатора через катушку? Однако общее есть. Скоро вы узнаете, что и механические и электромагнитные колебания подчиняются совершенно одинаковым количественным законам. Это обнаруживается, если интересоваться не тем, что колеблется (груз на пружине или электрический ток в цепи), а тем, как совершаются колебания. Одинаковым законам подчиняются также волновые процессы различной природы.

В современной физике выделилась специальная дисциплина — физика колебаний. В ней колебания различной природы рассматриваются с единой точки зрения. Физика колебаний имеет очень большое практическое значение. Она занимается исследованием вибраций машин и механизмов; ее выводы лежат в основе электротехники переменных токов и радиотехники.

Глава I

МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ

§ 1. СВОБОДНЫЕ И ВЫНУЖДЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ

Колебательные движения, или колебания, чрезвычайно широко распространены в природе. Заставить предмет колебаться можно очень просто.

Подвесим пружину к штативу. К нижнему, свободному концу пружины прикрепим металлический шарик. Пружина растянется, и сила упругости $\vec{F}_0$ уравновесит силу тяжести $\vec{G}$, действующую на шарик (рис. 1, *а*). Если теперь вывести шарик из положения равновесия, слегка оттянув его вниз и отпустив, то он начнет совершать довольно интересное движение, вверх-вниз, вверх-вниз и т. д. (рис. 1, *б*). Такого рода движение, при котором тело поочередно смещается то в одну, то в другую сторону, и называется *колебанием*. С течением времени колебания затухают, и в конце концов шарик остановится.

Еще проще можно заставить шарик колебаться, если подвесить его на нити. В положении равновесия нить вертикальна и сила тяжести $\vec{G}$, действующая на шарик, уравновешивается силой упругости $\vec{F}_0$ нити (рис. 2, *а*). Если шарик отклонить и отпустить, то он начнет качаться направо-налево, направо-налево (рис. 2, *б*) до тех пор, пока колебания не затухнут. Шарик на нити — это про-

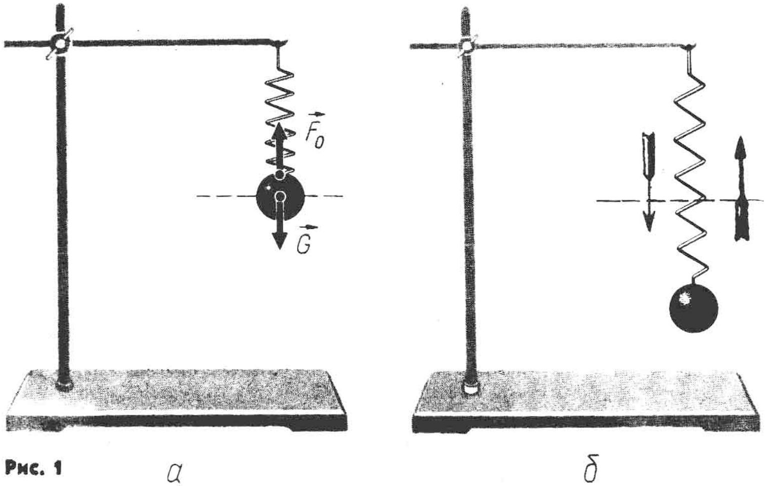
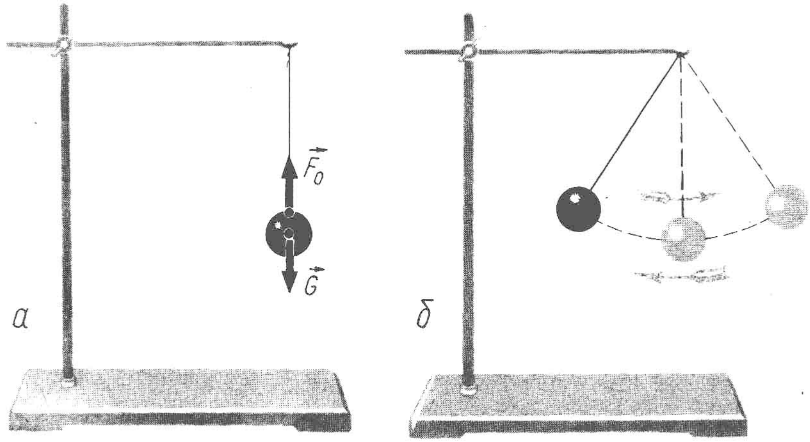


Рис. 1 *а* *б*



стейший *маятник*[1]. Вообще же обычно **маятником называют подвешенное на нити или закрепленное на оси тело, которое может совершать колебания под действием силы тяжести.** При этом ось не должна проходить через центр тяжести тела. Маятником можно назвать линейку, повешенную на гвоздь, люстру, коромысло рычажных весов и т. д.

Что же является наиболее характерным признаком колебательного движения? Более всего бросается в глаза, что при колебаниях движения тела п о в т о р я ю т с я или почти повторяются. Так, маятник, совершив одно колебание, т. е. проделав путь от крайнего левого положения до крайнего правого и обратно, вновь совершает то же движение. Если движение повторяется точно, то его называют *периодическим.*

Колебания — это движения, которые точно или приблизительно повторяются через определенные интервалы времени.

Повторяются движения поршней в двигателе автомобиля, поплавка на волне, ветки дерева на ветру, нашего сердца. Все это различные примеры колебаний.

Свободные колебания. Группу тел, движения которых мы изучаем, называют в механике *системой тел* или просто *системой.* Силы, действующие между телами системы, называются *внутренними. Внешними силами* называют силы, действующие на тела системы со стороны тел, не входящих в нее.

Самым простым видом колебаний являются колебания, возникающие в системе под действием внутренних сил после того, как система была выведена из положения равновесия. Такие колеба-

[1] Нужно иметь в виду, что шарик на нити будет представлять собой маятник лишь в том случае, если на него действует сила тяжести. Создающий эту силу земной шар входит в колебательную систему, которую мы для краткости называем просто маятником.

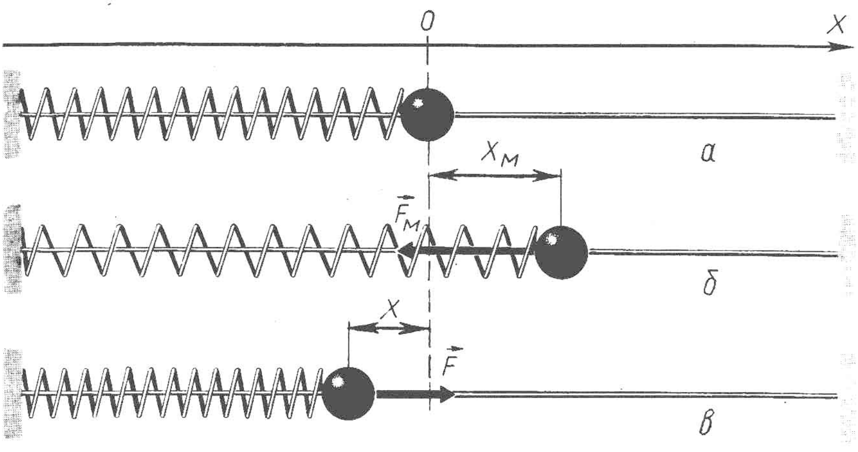


Рис. 3

ния называют *свободными*. Колебания груза на пружине или груза, подвешенного на нити,— это примеры свободных колебаний. После выведения этих систем из положения равновесия возникают условия, при которых тела колеблются без воздействия внешних периодически меняющихся сил.

Вынужденные колебания. Если мы начнем двигать рукой вперед и назад книгу на столе, то она будет совершать колебания, но эти колебания не будут свободными. Колебания книги в данном случае вызваны воздействием со стороны руки, периодически меняющимся по величине и направлению.

Колебания, совершаемые телами под действием периодически изменяющихся сил, называются *вынужденными*.

Вынужденными, в частности, являются колебания поршней в цилиндрах двигателя внутреннего сгорания, иглы швейной машины и т. д.

§ 2. УСЛОВИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ СВОБОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ

Выясним, какими свойствами должна обладать система, для того чтобы в ней могли возникнуть свободные колебания. Удобнее всего рассмотреть вначале колебания шарика на стержне вдоль горизонтали под действием силы упругости пружины (рис. 3)[1].

Если сместить шарик из положения равновесия (рис. 3, *а*) вправо, то длина пружины увеличится на $x_м$ (рис. 3, *б*) и на шарик начнет действовать сила упругости $\vec{F}$ со стороны пружины. Эта сила согласно закону Гука пропорциональна деформации пружи-

[1] Анализ колебаний шарика, подвешенного на вертикальной пружине, несколько сложнее, так как в этом случае действуют одновременно переменная сила упругости пружины и постоянная сила тяжести. Но, впрочем, характер колебаний в том и другом случае совершенно одинаков.

ны и направлена влево. Под действием силы $\vec{F}$ шарик начнет двигаться с ускорением влево, увеличивая скорость. Сила F при этом будет убывать, так как деформация пружины уменьшается. В момент, когда шарик достигнет положения равновесия, сила упругости пружины станет равной нулю. Следовательно, согласно второму закону Ньютона станет равным нулю и ускорение шарика.

Но к этому моменту скорость шарика уже достигнет некоторого значения. Поэтому, не останавливаясь в положении равновесия, он будет вследствие инертности продолжать двигаться влево. Пружина при этом укорачивается; в результате появляется сила упругости, направленная уже вправо и тормозящая движение шарика (рис. 3, *в*). Эта сила, а значит, и направленное вправо ускорение увеличиваются по модулю прямо пропорционально модулю смещения x шарика относительно положения равновесия. Скорость же уменьшается до тех пор, пока в крайнем левом положении не обратится в нуль. После этого шарик начнет ускоренно двигаться вправо. С уменьшением модуля смещения x сила $\vec{F}$ убывает по модулю и в положении равновесия опять обращается в нуль. Но шарик уже успевает к этому моменту приобрести скорость и, следовательно, продолжает двигаться вправо. Это движение приводит к растяжению пружины и к появлению силы, направленной влево. Движение шарика тормозится до полной остановки в крайнем правом положении, после чего весь процесс повторяется сначала.

Если бы не существовало трения, то движение шарика не прекратилось бы никогда. Однако трение (в частности, сопротивление воздуха) есть, причем направление силы сопротивления как при движении шарика вправо, так и при его движении влево все время противоположно направлению скорости. Поэтому трение тормозит движение шарика, и размах его колебаний постепенно уменьшается до тех пор, пока движение не прекратится. При малом трении затухание становится заметным лишь после того, как шарик совершит много колебаний. И если интересоваться движением шарика на протяжении не очень большого интервала времени, то затуханием его колебаний можно пренебречь. В этом случае влияние силы сопротивления на движение можно не учитывать.

Для уменьшения трения при колебаниях шарика вдоль горизонтали используют установку, изображенную на рисунке 4. Ша-

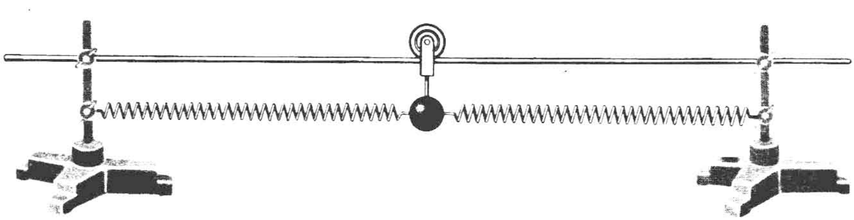


Рис. 4

рик с помощью стерженька прикреплен к обтрен блока, который может кататься с малым трением вдоль горизонтального направляющего стержня. Сила тяжести, действующая на шарик, в любой момент времени компенсируется силой упругости стерженька. Колебания шарика происходят под действием сил упругости двух пружин.

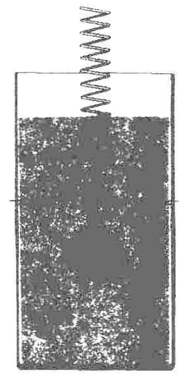


Рис. 5

Если сила сопротивления велика, то пренебречь ее действием даже в течение малых интервалов времени нельзя. Опустите шарик на пружине в стакан с вязкой жидкостью, например с глицерином (рис. 5). Если пружина достаточно мягкая, то выведенный из положения равновесия шарик совсем не будет колебаться. Под действием силы упругости он просто вернется в положение равновесия (пунктирная линия на рисунке 5); за счет действия силы сопротивления скорость его в положении равновесия будет практически равна нулю.

Теперь можно сообразить, что является существенным для того, чтобы в системе могли возникнуть свободные колебания. Должны выполняться два условия. В о - п е р в ы х, при выведении тела из положения равновесия в системе должна возникать сила, направленная к положению равновесия и, следовательно, стремящаяся возвратить тело в положение равновесия. Именно так действует в рассмотренной нами системе пружина: и при перемещении шарика влево, и при его перемещении вправо сила упругости направлена к положению равновесия. В о - в т о р ы х, трение в системе должно быть достаточно мало. Иначе колебания быстро затухнут или даже не возникнут. Незатухающие колебания возможны лишь при отсутствии трения.

Оба условия являются совершенно общими, справедливыми для любой системы, в которой могут возникнуть свободные колебания. Проверим это на другой простой системе — маятнике.

§ 3. МАТЕМАТИЧЕСКИЙ МАЯТНИК

Рассмотрим простой маятник — тяжелый шарик, подвешенный на длинной нити. Если размеры шарика много меньше длины нити, то этими размерами можно пренебречь и рассматривать шарик как материальную точку. Растяжением нити также можно пренебречь, так как оно очень мало. Можно пренебречь и массой нити по сравнению с массой шарика. Таким образом, вместо реального маятника — шарика определенного размера на нити, которая, конечно, немного деформируется при движении и имеет массу, мы вправе рассматривать простую модель: материальную точку, подвешенную на нерастяжимой невесомой нити. Такая модель маятника называется *математическим маятником*. Маленький шарик

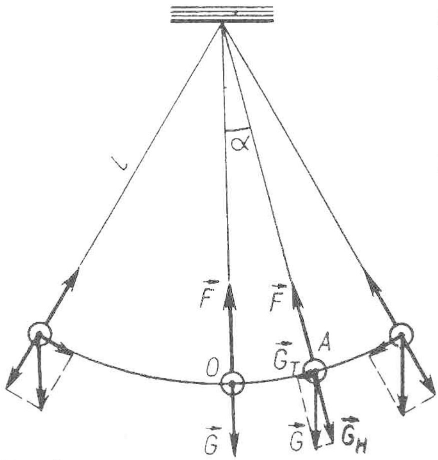


Рис. 6

на длинной тонкой нити должен вести себя практически так же, как и математический маятник. Выведем маятник из положения равновесия и отпустим. На шарик будут действовать две силы: сила тяжести $\vec{G}=m\vec{g}$, направленная вертикально вниз, и сила упругости нити $\vec{F}$, направленная вдоль нити (рис. 6). Конечно, при движении маятника на него еще действует сила сопротивления. Но мы будем считать ее пренебрежимо малой.

Для того чтобы отчетливо представить себе динамику движения маятника, удобно силу тяжести разложить на две составляющие: нормальную $\vec{G}_н$, направленную вдоль нити, и тангенциальную $\vec{G}_т$, направленную перпендикулярно нити по касательной к траектории шарика. Сила упругости нити $\vec{F}$ и составляющая $\vec{G}_н$ силы тяжести перпендикулярны скорости маятника и сообщают ему так называемое *нормальное* или *центростремительное ускорение,* направленное к центру дуги окружности — траектории маятника. Работа этих сил равна нулю, и поэтому согласно теореме о кинетической энергии они не меняют скорости маятника по модулю. Их действие приводит лишь к тому, что вектор скорости непрерывно меняет направление, так что в любой момент времени скорость направлена по касательной к дуге окружности.

Тангенциальная составляющая $\vec{G}_т$ силы тяжести создает так называемое *тангенциальное ускорение,* характеризующее изменение модуля скорости. Полное ускорение маятника равно геометрической сумме тангенциального и нормального ускорений. Под действием составляющей $\vec{G}_т$ маятник начинает двигаться по дуге окружности вниз с нарастающей скоростью. По мере движения маятника тангенциальная составляющая силы тяжести, направленная к положению равновесия, уменьшается и в момент, когда маятник проходит через положение равновесия, она становится равной нулю. Вследствие своей инертности маятник движется дальше, поднимаясь вверх. При этом составляющая $\vec{G}_т$ уже будет направлена против скорости. Поэтому скорость маятника уменьшается, и тем быстрее, чем больше угол между нитью и вертикалью. Ведь с увеличением угла эта составляющая силы тяжести растет. В момент остановки маятника в верхней точке его тангенциальное ускорение максимально и направлено в сторону положения равновесия. Далее скорость маятника увеличивается, и он снова движется к положению равновесия. Пройдя его, он возвращается в исходное положение, если только сила сопротивления мала и ее работой в течение небольшого интервала времени можно пренебречь. Опустив маятник в сосуд с вязкой жидкостью, мы тут же обнаружим, что колебания не происходят совсем или затухают очень быстро.

?

1. Какие колебания называют свободными? Приведите примеры свободных колебаний, не упомянутые в тексте.
2. Какие колебания называют вынужденными? Приведите примеры вынужденных колебаний.
3. При каких условиях в системе возникают свободные колебания?

§ 4. УРАВНЕНИЕ ДВИЖЕНИЯ ТЕЛА, КОЛЕБЛЮЩЕГОСЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ СИЛ УПРУГОСТИ

Для того чтобы описать количественно процесс колебаний тела под действием силы упругости пружины или колебания шарика, подвешенного на нити, нужно воспользоваться законами механики Ньютона.

Согласно второму закону Ньютона произведение массы тела m на ускорение $\vec{a}$ равно равнодействующей $\vec{F}$ всех сил, приложенных к телу:

$$m\vec{a} = \vec{F}. \tag{1.1}$$

Запишем уравнение движения для шарика, движущегося прямолинейно вдоль горизонтали под действием пружины (см. рис. 3). Направим ось OX вправо. Пусть начало отсчета координат соответствует положению равновесия (см. рис. 3, *а*).

Движение вдоль оси OX определяется проекцией F_x на это направление силы упругости $\vec{F}$ пружины. Эта проекция прямо пропорциональна смещению шарика из положения равновесия. Смещение равно координате x шарика, причем проекция силы и координата имеют противоположные знаки (см. рис. 3, *б* и *в*). Следовательно,

$$F_x = -kx, \tag{1.2}$$

где k — жесткость пружины.

Уравнение движения шарика запишется так:

$$ma_x = -kx, \tag{1.3}$$

где a_x — проекция ускорения на направление оси OX. Разделив левую и правую части уравнения (1.3) на m, получим:

$$a_x = -\frac{k}{m}x. \tag{1.4}$$

Так как масса m и жесткость k являются постоянными величинами, то их отношение $\frac{k}{m}$ также является постоянной величиной. Мы получили уравнение колебаний тела под действием силы упругости. Оно очень просто: **проекция a_x ускорения тела прямо пропорциональна его координате x, взятой с противоположным знаком.**

Самым замечательным является то, что такие же уравнения описывают свободные колебания в самых различных системах.

§ 5. УРАВНЕНИЕ ДВИЖЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МАЯТНИКА

При колебаниях шарика на нерастяжимой нити он все время движется по дуге окружности, радиус которой равен длине нити l. Поэтому положение шарика в любой момент времени определяется одной величиной — углом α отклонения нити от вертикали. Будем считать угол α положительным, если маятник отклонен направо от положения равновесия, и отрицательным, если налево (см. рис. 6). Модуль скорости маятника непрерывно изменяется под действием тангенциальной составляющей $\vec{G}_т$ силы тяжести. Быстрота изменения модуля скорости маятника определяется тангенциальным ускорением. Об этом было сказано в § 3.

Проекция силы тяжести на касательную к траектории шарика в момент, когда нить маятника отклонена от положения равновесия на угол α, выражается так:

$$G_т = -G\sin\alpha = -mg\sin\alpha. \qquad (1.5)$$

Здесь знак «—» стоит потому, что $G_т$ и α имеют противоположные знаки. Согласно второму закону Ньютона

$$ma_т = G_т,$$

или

$$ma_т = -mg\sin\alpha, \qquad (1.6)$$

где $a_т$ — проекция ускорения на касательную к траектории.

Разделив левую и правую части этого уравнения на m, получим:

$$a_т = -g\sin\alpha. \qquad (1.7)$$

До сих пор предполагалось, что углы отклонения нити маятника от вертикали могут быть любыми. В дальнейшем будем считать их малыми. При малых углах, если измерять угол в радианах,

$$\sin\alpha \approx \alpha.$$

Следовательно, можно принять

$$a_т = -g\alpha. \qquad (1.8)$$

Смещение шарика от положения равновесия можно характеризовать не только углом, но и величиной s, измеряемой длиной дуги OA (см. рис. 6), взятой со знаком «+», если шарик смещается от положения равновесия O вправо, и со знаком «—», если он смещается влево. Очевидно, что

$$s = \alpha l. \tag{1.9}$$

Подставив вместо α выражение $\frac{s}{l}$, получим:

$$a_т = -\frac{g}{l}s. \tag{1.10}$$

Это уравнение совпадает с уравнением движения шарика на пружине (1.4). Здесь только вместо проекции ускорения a_x стоит проекция ускорения $a_т$ и вместо координаты x — величина s. Да и коэффициент пропорциональности зависит уже не от жесткости пружины и массы шарика, а от ускорения свободного падения и длины нити. Но по-прежнему ускорение (теперь тангенциальное) прямо пропорционально смещению (определяемому дугой) шарика от положения равновесия.

Мы пришли к замечательному выводу: **уравнения движения, описывающие колебания таких различных систем, как шарик на пружине и маятник, одинаковы.** Это означает, что движение шарика и колебания маятника происходят одинаковым образом, т. е. смещения шарика на пружине и шарика маятника от положений равновесия изменяются со временем по одному и тому же закону, несмотря на то, что силы, вызывающие колебания, имеют различную физическую природу. В первом случае это сила упругости пружины, а во втором — составляющая силы тяжести.

Уравнение движения (1.4), как и уравнение (1.10), выглядит внешне очень просто: **ускорение прямо пропорционально координате.** Но решить его, т. е. определить, как меняется положение колеблющегося тела в пространстве с течением времени, далеко не просто. В восьмом классе мы рассматривали движение с постоянным ускорением. При колебаниях же ускорение меняется со временем, так как меняется сила, действующая на тело.

§ 6. ГАРМОНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ

Зная, как связаны между собой ускорение и координата колеблющегося тела, можно на основе математического анализа найти зависимость координаты от времени.

Ускорение — вторая производная координаты по времени. Мгновенная скорость, как вам известно из курса математики IX класса, представляет собой производную координаты по времени. Ускорение — это производная скорости по времени, или вторая производная координаты по времени[1]. Поэтому уравнение (1.4), описывающее колебания груза на пружине, можно записать так:

$$x'' = -\frac{k}{m}x, \tag{1.11}$$

где x'' — вторая производная координаты по времени. Согласно уравнению (1.11) при свободных колебаниях координата x изменяется со временем так, что вторая производная координаты по времени прямо пропорциональна самой координате и противоположна ей по знаку.

Гармонические колебания. Из курса математики X класса известно, что функции синус и косинус обладают тем свойством, что вторая производная функции пропорциональна самой функции, взятой с противоположным знаком. Можно доказать, что никакие другие функции этим свойством не обладают. Значит, **координата тела, совершающего свободные колебания, меняется с течением времени по закону синуса или косинуса.**

Так как при колебаниях движения тела периодически повторяются, то не удивительно, что изменение со временем координаты тела, совершающего свободные колебания, выражается через синус или косинус, которые являются периодическими функциями.

Периодические изменения физической величины в зависимости от времени, происходящие по закону синуса или косинуса, называются гармоническими колебаниями.

Вначале мы будем рассматривать гармонические изменения координаты. В дальнейшем познакомимся с гармоническими изменениями других величин.

Амплитуда колебаний. Важной характеристикой колебательного движения является амплитуда.

Амплитудой гармонических колебаний называется модуль наибольшего смещения тела от положения равновесия.

Амплитуда может иметь различные значения в зависимости от того, насколько мы смещаем тело от положения равновесия в начальный момент времени, и от того, какая скорость сообщается при этом телу. Амплитуда определяется начальными условиями.

Максимальные по модулю значения синуса и косинуса равны единице. Поэтому решение уравнения (1.11) должно иметь вид произведения амплитуды $x_м$ на синус или косинус, которые должны быть функциями времени.

Решение уравнения движения, описывающего свободные колебания. Какую же форму имеет решение уравнения (1.11)? Нельзя просто считать, что $x = x_м \cos t$ или $x = x_м \sin t$, так как в этом случае $x'' = -x_м \cos t = -x$. Небольшое усложнение формы решения сразу приведет нас к цели. Положим,

$$x = x_м \cos \omega_0 t, \tag{1.12}$$

---

[1] Для краткости мы говорим об ускорении и скорости. В действительности имеются в виду проекции этих векторных величин.

где ω_0—некоторая постоянная величина, не зависящая от времени.

Теперь первая производная —

$$x' = -\omega_0 x_м \sin \omega_0 t,$$

а вторая производная —

$$x'' = -\omega_0^2 x_м \cos \omega_0 t = -\omega_0^2 x. \quad (1.13)$$

Это уравнение в точности совпадает с уравнением движения (1.11), если положить

$$\omega_0^2 = \frac{k}{m}, \text{ или } \omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}. \quad (1.14)$$

Следовательно, функция

$$x = x_м \cos \sqrt{\frac{k}{m}} t$$

есть решение исходного уравнения (1.11) движения груза на пружине. Конечно, и функция

$$x = x_м \sin \sqrt{\frac{k}{m}} t$$

также будет решением этого уравнения.

Период и частота гармонических колебаний. Выясним теперь физический смысл величины ω_0.

При колебаниях движения тела периодически повторяются. **Минимальный промежуток времени T, через который движение тела полностью повторяется, называют периодом колебаний.**

Зная период, можно определить *частоту колебаний,* т. е. число колебаний в единицу времени, например в секунду. Если одно колебание совершается за время T, то число колебаний за секунду ν определяется так:

$$\nu = \frac{1}{T}. \quad (1.15)$$

В системах единиц СГС и СИ частота колебания равна единице, если в секунду совершается одно колебание. Единица измерения частоты называется г е р ц е м (сокращенно — Гц) в честь немецкого физика Генриха Г е р ц а.

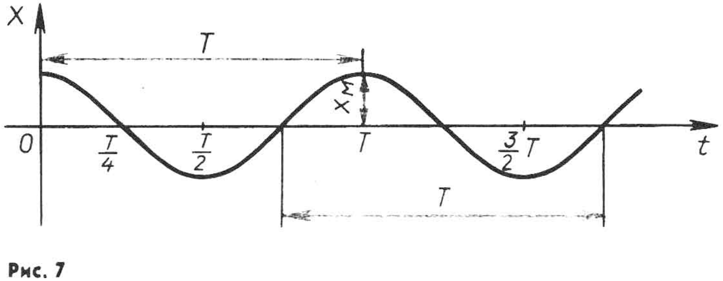


Рис. 7

Через промежуток времени, равный периоду T, т. е. при увеличении аргумента косинуса на $\omega_0 T$, движение повторяется и косинус принимает прежнее значение. Но из математики известно, что наименьший период косинуса равен 2π. Следовательно,

$$\omega_0 T = 2\pi,$$

откуда

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu. \tag{1.16}$$

Таким образом, величина ω_0 — это число колебаний тела, но не за секунду, а за 2π секунд. Она называется *циклической* или *круговой частотой* [1].

Частоту свободных колебаний называют *собственной частотой колебательной системы.*

График изменения координаты со временем при гармонических колебаниях. Если в начальный момент времени ($t=0$) сместить тело от положения равновесия на расстояние $x_м$ и отпустить, то в дальнейшем координата тела будет меняться по закону

$$x = x_м \cos \omega_0 t.$$

График зависимости координаты тела от времени представляет собой косинусоиду, изображенную на рисунке 7. Через промежутки времени T движение тела в точности повторяется. Подобный график можно заставить вычертить само колеблющееся тело, например маятник. На рисунке 8 изображен маятник с песочницей. На равномерно движущемся под ним листе картона он струйкой песка вычерчивает график зависимости координаты от времени. Это простой метод «временнóй развертки» колебаний, дающий

---

[1] Часто в дальнейшем для краткости мы будем называть циклическую частоту просто частотой. Отличить циклическую частоту ω от частоты ν можно по обозначениям.

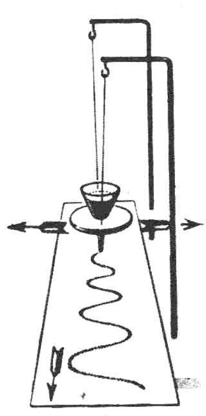


Рис. 8

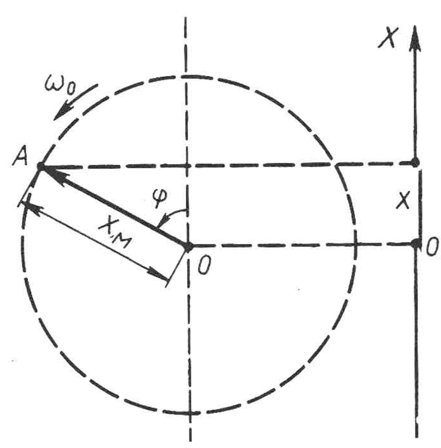


Рис. 9