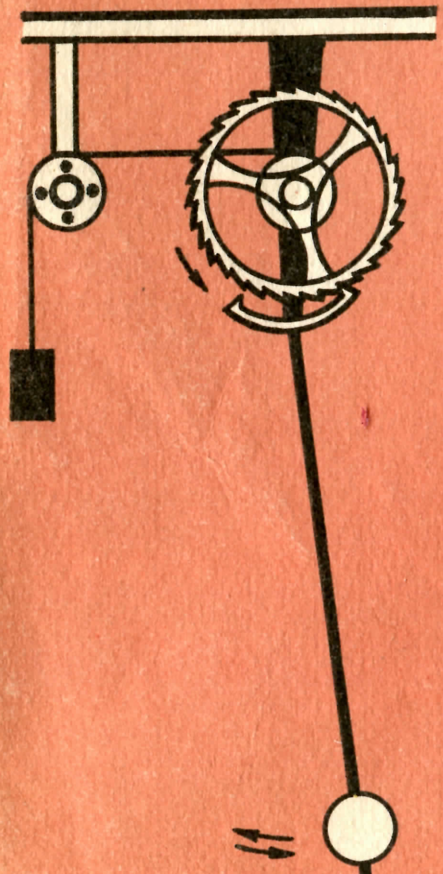
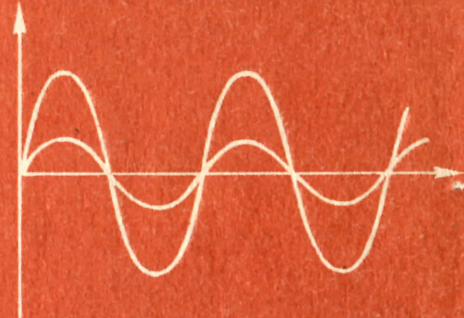
А. К. КИКОИН С. Я. ШАМАШ Э. Е. ЭВЕНЧИК

МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

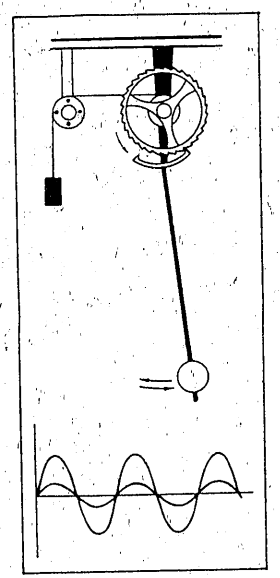




8

А. К. КИКОИН С. Я. ШАМАШ Э. Е. ЭВЕНЧИК

МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ



ВКЛАДЫШ К УЧЕБНИКУ ФИЗИКИ
ДЛЯ 8 КЛАССА СРЕДНЕЙ ШКОЛЫ

Рекомендовано Главным управлением школ
Министерства просвещения СССР

МОСКВА «ПРОСВЕЩЕНИЕ» 1986

ББК 22.3я72
К38

Абрам Константинович Кикоин
Сергей Яковлевич Шамаш
Эсфирь Ефимовна Эвенчик

МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

Вкладыш к учебнику физики для 8 класса средней школы

Зав. редакцией *И. А. Иванов*
Редактор *В. А. Обменина*
Младший редактор *О. В. Агапова*
Художники *Г. М. Чеховский, А. Ф. Сысоев*
Художественный редактор *В. М. Прокофьев*
Технические редакторы *Л. М. Абрамова, Е. Н. Зелянина*
Корректоры *Н. Б. Гитлевич, И. Н. Панкова*

ИБ № 10463

Сдано в набор 16.05.86. Подписано к печати 04.09.86. Формат $60\times90^1/_{16}$. Бумага офсетная № 2. Гарнитура литературная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 2. Усл. кр.-отт. 2,38. Уч.-изд. л. 2. Тираж 3 800 000 экз. Заказ 994. Цена 3 коп.

Ордена Трудового Красного Знамени издательство «Просвещение» Государственного комитета РСФСР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 129846, Москва, 3-й проезд Марьиной рощи, 41.

Калининский ордена Трудового Красного Знамени полиграфкомбинат детской литературы им. 50-летия СССР Росглавполиграфпрома Госкомиздата РСФСР. 170040, Калинин, проспект 50-летия Октября, 46.

Кикоин А. К. и др.
К38 Механические колебания и волны: Вкладыш к учеб. физики для 8 кл. сред. шк./А. К. Кикоин, С. Я. Шамаш, Э. Е. Эвенчик.— М.: Просвещение, 1986.—32 с.: ил.

К $\frac{4306021100—743}{103(03)—86}$ инф. письмо —86 ББК 22.3я72

Механические колебания

Движение, которое повторяется

Своеобразные движения, которые называют колебательными или просто колебаниями, всем хорошо известны. Они широко распространены в окружающей нас жизни. Колеблются ветви деревьев во время ветра, металлическая пластинка, одним концом зажатая в тисках, качели, отклоненные от вертикали, вагоны на рессорах при движении и т. д. Колебательное движение совершает, например, тело, подвешенное на пружине, если его толкнуть в вертикальном направлении. Колебательное движение совершает также тело, скрепленное с пружиной, если его толкнуть в горизонтальном направлении (см. рис. 108, 109 учебника). Предоставленный после толчка самому себе груз движется вверх-вниз или вправо-влево. Это и есть колебательное движение. Колебаниями называют такое движение, при котором тело поочередно отклоняется то в одну, то в другую сторону. Главная особенность этого движения состоит в том, что оно *периодическое*. Периодичность движения означает, что через определенный промежуток времени, называемый периодом колебания, положение тела, т. е. его координата, точно или приблизительно повторяется.

1. Колебания тела на пружине

В § 34 учебника «Физика-8» указывалось, что тело совершает колебание тогда, когда на него действует сила упругости, а другие силы либо уравновешены, либо отсутствуют. Типичным примером такой силы можно считать силу упругости растянутой или сжатой пружины. Колебания тела на пружине мы и рассмотрим в первую очередь.

На рисунке 1, *а* показана пружина и скрепленное с ней тело. Пружина пока не деформирована (не сжата и не растянута), так что на тело сила упругости не действует. Будем считать, что сила трения между телом и опорой пренебрежимо мала. Сила тяжести уравновешена силой реакции опоры, так что тело находится в состоянии равновесия.

Направим координатную ось X вдоль опоры, а за начало отсчета примем точку на оси, определяющую положение центра массы тела, находящегося в равновесии ($x=0$).

Отведем тело влево от положения равновесия на некоторое расстояние A. При этом пружина окажется сжатой (рис.1, *б*) и на тело будет действовать сила упругости, направленная вправо. Если отпустить тело, оно станет двигаться с ускорением, направленным вправо, и дойдет до положения равновесия. Но в этом положении тело не остановится, а вследствие инертности перейдет его и будет продолжать двигаться вправо. При этом

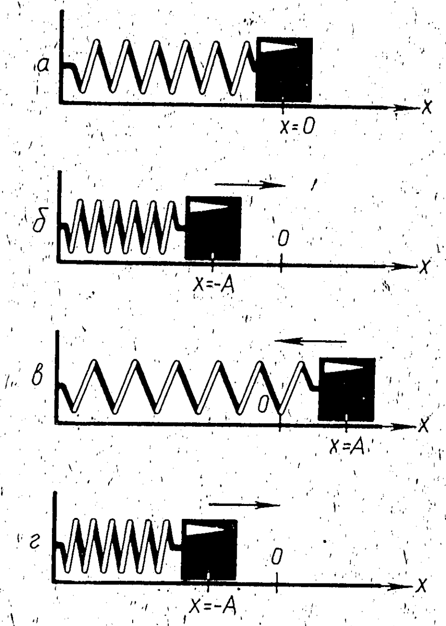


Рис. 1

пружина растягивается и на тело действует постепенно возрастающая сила упругости, направленная влево. Поэтому скорость тела убывает, и оно в конце концов остановится. Теперь пружина растянута, и, как показывает опыт, на максимальное расстояние, тоже равное A (рис. 1, *в*). На тело в этом положении действует максимальная сила, направленная влево, куда тело, после мгновенной остановки, начнет двигаться. Оно снова пройдет через положение равновесия (теперь уже справа налево) и опять отклонится от него на расстояние A, т. е. вернется в точку, откуда оно начало свое движение (рис. 1, *г*). Завершено одно колебание и начинается следующее, во всем на него похожее.

Мы видим, что в любой точке траектории колеблющегося тела сила упругости направлена к положению равновесия, т. е. противоположно отклонению от него. Эта сила пропорциональна отклонению x и ее проекция на ось X равна: $F_x = -kx$. Отклонение тела от положения равновесия называют *смещением*.

Механические колебания, которые происходят под действием силы, пропорциональной смещению и направленной противоположно ему, называют *гармоническими колебаниями*.

Амплитуда колебания. Из приведенного описания движения тела, скрепленного с пружиной, видно, что колеблющееся тело не удаляется от начала отсчета координаты на расстояние больше, чем A. Это наибольшее по модулю смещение тела от положения равновесия называется *амплитудой колебания*. Когда на тело сила трения не действует, амплитуда не изменяется. Амплитуда зависит только от того, на сколько было отведено тело от положения равновесия перед тем, как его предоставили самому себе.

Период и частота колебаний. На то, чтобы совершить одно полное колебание, требуется определенное время.

Продолжительность одного полного колебания называется *периодом колебания*. Обозначают период колебания буквой T и выражают его в с е к у н д а х.

Колебания характеризуются также частотой. *Частота колебаний* — это число колебаний в единицу времени. Если, например, период колебаний равен 0,1 с, то ясно, что частота равна $\frac{1}{0{,}1\ \text{с}} = 10$ колебаний/с.

За единицу частоты принимают частоту такого колебания, при котором за 1 с совершается одно колебание. Эта единица называется г е р ц е м (сокращенно Гц): 1 Гц $= 1 \text{с}^{-1}$.

Частота обозначается греческой буквой ν. Между периодом колебаний T и частотой ν связь очень простая: частота есть величина, обратная периоду, период — величина, обратная частоте:

$$\nu = \frac{1}{T}; \qquad T = \frac{1}{\nu}.$$

Скорость и ускорение при колебательном движении. Как и другие движения, колебательное движение характеризуется скоростью и ускорением. Но при колебательном движении обе эти величины *изменяются* от точки к точке, от одного момента времени к другому. Так, скорость колеблющегося тела в точках максимального отклонения от положения равновесия (при $x = A$ и $x = -A$) равна нулю — в этих точках тело останавливается, а затем движется в обратном направлении. Когда же тело проходит положение равновесия ($x = 0$), скорость тела максимальна. Ускорение, наоборот, в момент прохождения телом положения равновесия равно нулю, потому что в этом положении сила равна нулю. В точках же, соответствующих максимальному отклонению от положения равновесия ($x = A$ и $x = -A$), ускорение максимальное, потому что в этих точках сила упругости максимальна. Итак, скорость и ускорение в колебательном движении изменяются *периодически:* через каждый период T направление и модуль векторов скорости и ускорения повторяются.

Вопросы

1. Какое движение называют колебательным? В чем состоит главное отличие колебательного движения от других видов движения?
2. Что такое амплитуда колебания?
3. Как связаны между собой период и частота колебаний?
4. В каких точках траектории колеблющегося тела скорость равна нулю? ускорение равно нулю?
5. Чему равно перемещение колеблющегося тела за время, равное периоду колебания? Чему равен путь тела за это же время?
6. Какие колебания называют гармоническими?

2. Энергия тела в колебательном движении

Рассматривая движение тела, прикрепленного к пружине, мы видели, что если тело первоначально отвести на расстояние A от положения равновесия, например, влево, то оно, пройдя через положение равновесия, отклонится вправо. И мы утверждали на основании опыта, что и вправо оно отклонится на расстояние A. Но почему отклонения вправо и влево при колебаниях должны быть непременно одинаковыми? Это, оказывается, следует из закона сохранения энергии.

Из главы 9 учебника «Физика-8» мы знаем, что потенциальная энергия упруго сжатой или растянутой пружины равна

$\frac{kx^2}{2}$, где k — жесткость пружины и x — ее удлинение. В нашем случае в крайнем левом положении тела удлинение пружины $x=-A$ и, следовательно, потенциальная энергия системы равна $\frac{kA^2}{2}$. Кинетическая энергия в этот момент равна нулю, потому что скорость тела в этом положении равна нулю. Значит, потенциальная энергия $\frac{kA^2}{2}$ — это *полная энергия* системы в этот момент. Так как мы условились, что внешние силы, в том числе сила трения, равны нулю, то систему можно считать замкнутой и ее полная энергия при движении не может измениться. Когда тело при своем движении окажется в крайнем правом положении, его кинетическая энергия опять равна нулю и полная энергия опять равна потенциальной. А полная энергия измениться не могла. Значит, она снова равна $\frac{kA^2}{2}$. А это означает, что и вправо тело отклонится на расстояние, равное A (амплитуда колебания).

В положении равновесия, напротив, потенциальная энергия равна нулю, потому что $x=0$ (пружина не деформирована). В этом положении полная энергия тела равна его кинетической энергии $\frac{mv_m^2}{2}$, где m — масса тела, v_m — его скорость, которая в этот момент максимальна. Но эта кинетическая энергия тоже должна иметь значение, равное $\frac{kA^2}{2}$:

$$\frac{mv_m^2}{2}=\frac{kA^2}{2}.$$

При колебательном движении происходит, следовательно, превращение кинетической энергии в потенциальную и обратно. В любой же точке между положениями равновесия и максимального отклонения тело обладает и кинетической энергией, и потенциальной, но их сумма, т. е. полная энергия в любом положении тела, равна $\frac{kA^2}{2}$. ***Полная энергия колеблющегося тела пропорциональна квадрату амплитуды его колебаний.*** Это одно из важнейших свойств колебательного движения тела, скрепленного с пружиной.

Из закона сохранения энергии легко получить простое соотношение между амплитудой колебания и максимальной скоростью колеблющегося тела (оно нам будет необходимо в дальнейшем).

Как мы видели, $\frac{mv_m^2}{2}=\frac{kA^2}{2}$.

Отсюда

$$\frac{A^2}{v_m^2}=\frac{m}{k}, \text{ или } \frac{A}{v_m}=\sqrt{\frac{m}{k}}.$$

Вопросы

1. В каких точках траектории колеблющееся тело обладает только кинетической энергией?
2. В каких точках траектории колеблющееся тело обладает только потенциальной энергией?
3. Чему равна полная энергия колеблющегося тела в произвольной точке траектории?
4. Какова связь между амплитудой колебаний груза, скрепленного с пружиной, и его максимальной скоростью?

3. Геометрическая модель колебательного движения

Колебательное движение — движение периодическое, поэтому нужно получить формулу для вычисления периода колебаний. Эту формулу мы получим, если рассмотрим совместно колебание тела, скрепленного с пружиной, и сходное с ним движение тени шарика, обращающегося по окружности.

Пусть маленький шарик M равномерно движется со скоростью V по окружности, радиус которой равен амплитуде колебания ($R=A$) тела, скрепленного с пружиной. Движение шарика по окружности — это тоже движение периодическое. Ведь шарик через определенный промежуток времени T (период обращения) оказывается в том же самом месте. Но это не колебательное движение: тело, прикрепленное к пружине, движется «туда» и «обратно», а шарик движется все время только «туда» — по часовой стрелке или против часовой стрелки.

Рассмотрим, однако, не движение шарика, а движение его тени, образованной на вертикальном экране при освещении шарика сбоку (рис. 2). Эта тень представляет собой проекцию шарика на экран. Мы увидим, что тень шарика совершает колебательное движение вдоль горизонтальной линии с периодом, равным периоду обращения шарика. Именно это движение полностью аналогично колебанию груза на пружине. Чтобы убедиться в этом, получим на том же экране тень от совершающего колебания груза, прикрепленного к пружине (рис. 3).

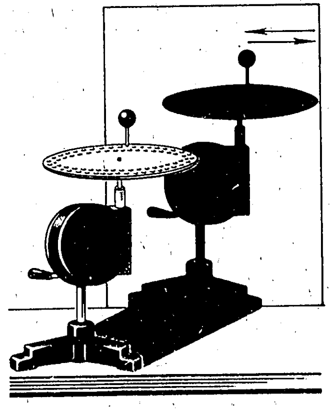


Рис. 2

Отклоним груз от положения равновесия на расстояние, равное радиусу окружности A, по которой обращается шарик. Меняя скорость обращения шарика, добьемся того, чтобы его период стал равен периоду колебания груза. В этом случае мы увидим, что тень шарика и тень груза совершают в точности одинаковые колебания: у них одинаковы периоды колебаний, смещения от положения равновесия, а следовательно, и скорости в любой момент времени. Значит, колебания тени шарика, движущегося по окружности, пол-

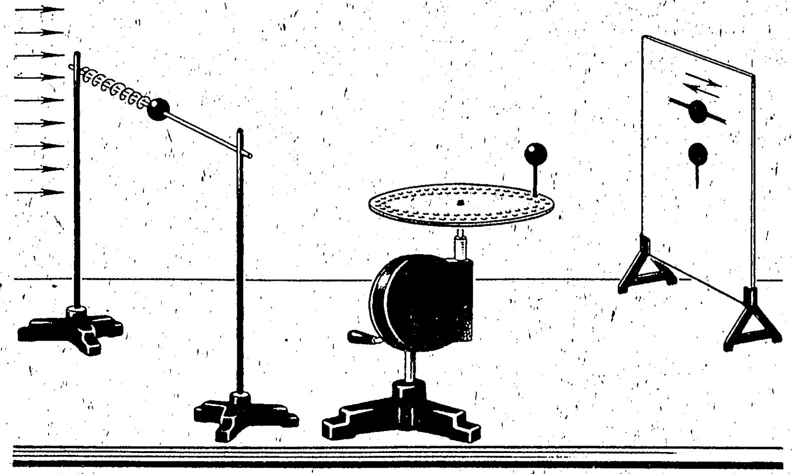


Рис. 3

ностью схожи с колебаниями груза, прикрепленного к пружине. В школьных условиях этот опыт легче осуществить с грузом, подвешенным к вертикально расположенной пружине (рис. 4).

Период колебания. Период колебания тени шарика, а следовательно, и груза на пружине можно определить, зная равный ему период обращения шарика по окружности. Как известно, период обращения шарика по окружности можно определить, разделив длину окружности ($2\pi A$) на его скорость (V):

$$T=\frac{2\pi A}{V}.$$

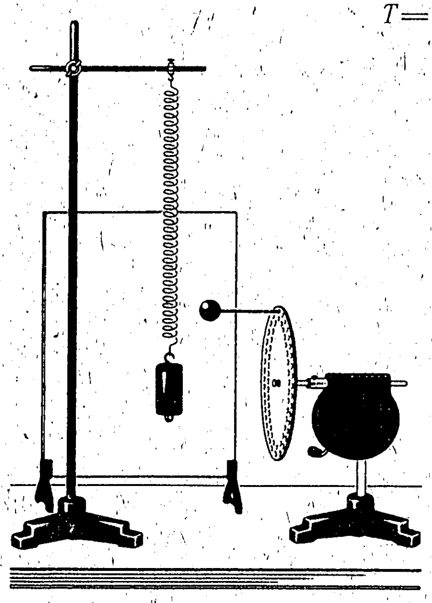


Рис. 4

Но какой скорости в колебательном движении соответствует скорость шарика V? Обратимся к схеме опыта (см. рис. 3), представленной на рисунке 5. На нем показано, что при равномерном движении шарика по окружности он последовательно занимает положения B, C, O, в которых модули (V) его скорости одинаковы. В это же время тень шарика на экране проходит через точки B', C', O', в которых скорость этой тени растет от нуля в точке B' до максимальной (v_m) в точке O'.

В точках O и O', в которых скорости шарика и его тени сонаправлены, эти скорости равны: $V=v_m$. Ведь тень шарика ни опередить, ни отстать от него не может.

Напомним, что опытным путем (см. рис. 3) установлено, что скорости тени шарика и тени колеблющегося груза на экране в любой точке равны. Значит, v_m — это также и максимальная скорость груза, скрепленного с пружиной.

Поэтому формулу для периода колебания груза на пружине можно записать так:

$$T=\frac{2\pi A}{v_m}.$$

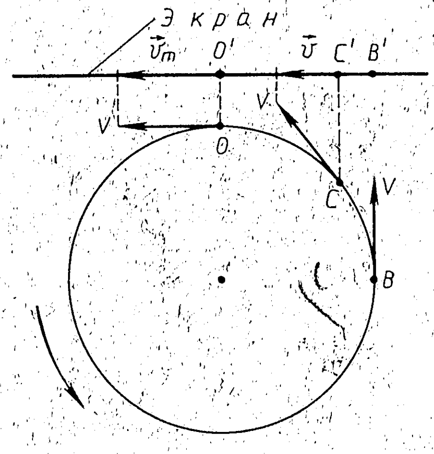


Рис. 5

А в § 2 мы видели, что отношение амплитуды колебания к максимальной скорости равно: $\frac{A}{v_m}=\sqrt{\frac{m}{k}}$.

Подставляя значение $\frac{A}{v_m}$ в предыдущее выражение, получим формулу периода колебания груза, прикрепленного к пружине:

$$T=2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}. \qquad (1)$$

Период колебаний, таким образом, растет при увеличении массы колеблющегося тела и уменьшается при увеличении жесткости пружины. Замечательно, что период колебаний не зависит от амплитуды.

Как изменяется координата колеблющегося тела со временем?[1] Для колебательного движения также должна быть решена основная задача механики: нужно получить формулу, показывающую, как координата колеблющегося тела изменяется со временем.

Обратимся опять к движению шарика по окружности и движению его тени (его проекции на вертикальный экран). Пусть в какой-то момент времени шарик находится в точке O (рис. 6), а его тень — в точке O'. Проведем в точку O радиус A. Через некоторый промежуток времени t шарик, двигаясь по окружности, оказывается в точке B, а его тень — в точке B' на расстоянии x от начала отсчета координаты O'. Проведем радиус и в точку B. При движении шарика из точки O в точку B радиус, проведенный к нему, повернулся на угол φ.

Из рисунка 6 видно, что смещение $x=BD$. Поэтому мы можем записать (из треугольника BDC), что

$$x=A\sin\varphi.$$

[1] Этот материал изучается в ознакомительном плане.

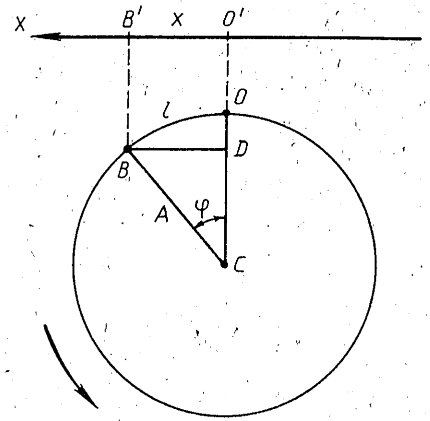


Рис. 6

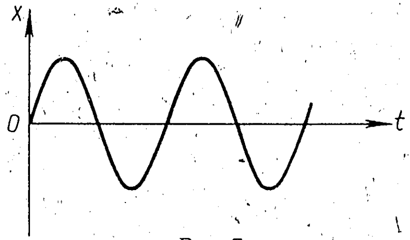


Рис. 7

Из алгебры (VII класс) известно, что угол φ в радианах равен отношению длины дуги (l) к радиусу окружности (A):

$$\varphi=\frac{l}{A}.$$

При равномерном движении по окружности длина дуги связана со скоростью (V) обращения тела формулой $l=Vt$.

Так как $V=\frac{2\pi A}{T}$, то $l=\frac{2\pi A}{T}t$.

Следовательно,

$$\varphi=\frac{2\pi}{T}t. \text{ Тогда } x=A\sin\frac{2\pi}{T}t.$$

Эта формула и показывает, как изменяется с течением времени координата колеблющегося тела. Графиком зависимости координаты x от времени t для этого движения является кривая (рис. 7), называемая *синусоидой*.

Вопросы

1. В чем состоит сходство движения тела, скрепленного с пружиной, и движения тени шарика, обращающегося по окружности?
2. В чем смысл величин, входящих в формулу (1)?

Пример решения задачи

На спиральной пружине, жесткость которой $k=100$ Н/м, подвешено тело массой m. Если вывести эту систему из состояния равновесия, то тело колеблется, делая 300 колебаний в минуту. Чему равна масса тела?

Решение. Массу можно найти из формулы $T=2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$.

$$m=\frac{T^2k}{4\pi^2}. \qquad \text{Так как } T=\frac{1}{\nu}, \text{ то } m=\frac{k}{4\pi^2\nu^2}.$$

Подставляя сюда данные из условия задачи, находим:

$$m=\frac{100\ \text{Н/м}}{4\cdot(3{,}14)^2\cdot 25\ \text{с}^{-2}}\approx 0{,}1\ \text{кг}.$$

Упражнение 1

1. Чему равна частота колебаний груза на пружине, если масса груза равна 100 г, а жесткость пружины 40 Н/м?
2. Чему равна жесткость пружины, если скрепленное с ней тело массой 30 г совершает за 1 мин 300 колебаний?
3. Тело, прикрепленное к пружине, совершает колебания с некоторым периодом T. Если увеличить массу тела на 60 г, то период колебаний удваивается. Какова первоначальная масса тела?

4. Математический маятник

Мы познакомились с гармоническими колебаниями, которые совершает тело под действием силы упругости. Для этой силы характерно то, что в любой точке траектории тела сила направлена к положению равновесия; она как бы стремится вернуть тело в это положение. Но можно ли утверждать, что гармонические колебания возможны только под действием силы упругости? Оказывается, нет. Всякая сила, которая в любой точке траектории направлена к положению равновесия, а по модулю пропорциональна смещению, заставит тело совершать гармонические колебания.

Интересным и важным примером колебательного движения, не связанного с действием только силы упругости, служит движение маятника — тела, прикрепленного к нити, другой конец которой закреплен. Если у маятника тело (груз) имеет размеры много меньшие, чем длина нити, а масса нити ничтожно мала по сравнению с массой груза, то такой маятник называют *математическим*. Практически тяжелый шарик малого размера на длинной нити ведет себя как математический маятник.

Когда нить занимает вертикальное положение, маятник находится в покое. Это положение равновесия. Если маятник отвести в сторону и отпустить, то он начнет совершать колебания.

На первый взгляд кажется, что движение маятника не совсем похоже на движение тела, скрепленного с пружиной,— это тело колеблется по прямой, а маятник — по дуге. Но если отклонить маятник на малый угол, то дуга, по которой движется груз на нити, будет мало отличаться от хорды. В этом можно убедиться, рассмотрев стробоскопический снимок колебаний маятника,

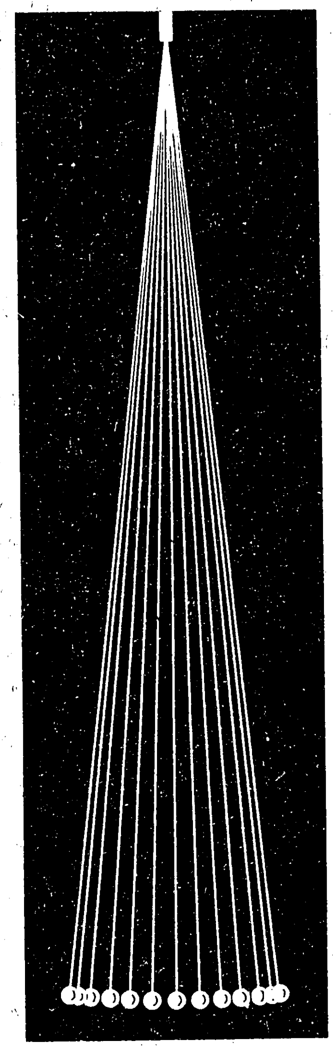


Рис. 8

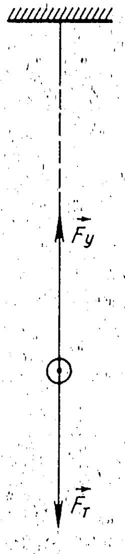


Рис. 9

Рис. 10

отклоненного на малый угол (рис. 8). Только в этом случае движение маятника похоже на движение тела, прикрепленного к пружине (комбинацию «тело — пружина» называют часто *пружинным* маятником). Практически для этого нужно, чтобы угол отклонения маятника от вертикали не превышал 5—8°.

Причину сходства математического и пружинного маятников мы выясним, если рассмотрим силы, заставляющие математический маятник совершать колебания.

Сила, вызывающая колебание маятника. В положении равновесия на груз действует сила тяжести $\vec F_{\text{т}}$ и сила упругости $\vec F_{\text{у}}$ (рис. 9). Равновесие маятника указывает на то, что эти силы равны по модулю и противоположны по направлению. Но вот маятник отведен в сторону на угол φ (рис. 10). На груз по-прежнему действуют те же силы, но теперь их равнодействующая $\vec F$ не равна нулю. При малых углах отклонения маятника можно считать, что она направлена по касательной к дуге, близкой к хорде, стягивающей эту дугу. Именно эта равнодействующая $\vec F$ и заставляет груз двигаться с ускорением к положению равновесия. Она равна

$$\vec F=\vec F_{\text{т}}+\vec F_{\text{у}},$$

или в проекциях на касательную к дуге

$$F_{\text{кас}}=(F_{\text{т}})_{\text{кас}}. \qquad (1)$$

(В этой записи учтено, что проекция силы упругости на касательную, к которой она перпендикулярна, равна нулю: $(F_{\text{у}})_{\text{кас}}=0$.)

Из треугольника BDC, в котором угол BDC тоже равен φ (см. рис. 10), можно определить проекцию силы тяжести на касательную к дуге. Она равна $F_{\text{т}}\sin\varphi$, или

$mg\sin\varphi$. А из треугольника OAB видно, что $\sin\varphi=\frac{x}{l}$, где x — смещение маятника.

Поэтому проекция равнодействующей на касательную

$$F_{\text{кас}}=-\frac{mg}{l}x.$$

Знак «минус» поставлен потому, что сила $\vec F$ направлена в сторону, противоположную смещению.

Из этой формулы видно, что сила, под действием которой колеблется маятник, очень похожа на силу упругости, вызывающую колебания пружинного маятника ($F_x=-kx$). Но роль жесткости k здесь играет величина $\frac{mg}{l}$. Как и сила упругости, сила $\vec F$ пропорциональна смещению x и направлена противоположно ему. В этом и состоит причина сходства движений математического и пружинного маятников: одинаковые причины приводят к одинаковым следствиям. В таком случае математический маятник должен совершать колебание, период которого мы определим, если в формулу $T=2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$ для периода колебания пружинного маятника вместо k подставим $\frac{mg}{l}$. Тогда период колебания математического маятника будет равен:

$$T=2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}. \qquad (2)$$

Из формулы (2) видно, что период колебания маятника зависит от длины подвеса и не зависит от массы тела; он не зависит также от амплитуды колебаний. Именно поэтому маятник используется для регулировки хода часов.

Маятник находит также важное применение в геологической разведке. Из формулы (2) видно, что период колебания маятника зависит от ускорения свободного падения g. А в § 31 учебника «Физика-8» мы видели, что в тех местах на Земле, где залегают породы, плотность которых отличается от средней плотности Земли, значение g может отличаться от его значения на данной широте. Измеряя с помощью маятника значение g, можно такие залежи обнаружить.

Отметим важное отличие пружинного маятника от математического. Из формул $T=2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$ и $T=2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ видно, что в отличие от математического маятника *период колебания пружинного маятника зависит от массы груза.* Эта особенность пружинного маятника позволяет использовать его для измерения массы тела (что и было показано при решении задачи в § 3). Самое интересное, что такой способ измерения массы может быть использован и в невесомости — ведь период колебания такого маятника

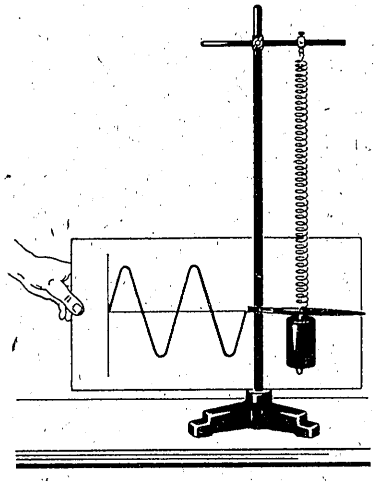


Рис. 11

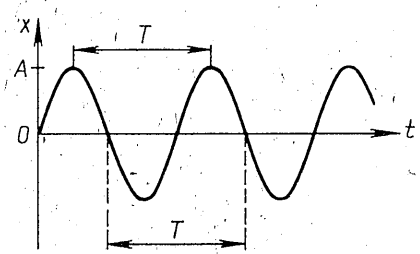


Рис. 12

зависит только от массы груза и жесткости пружины. Прибор для измерения массы с помощью пружинного маятника называется масс-метром. Таким прибором в космических полетах измеряют массу космонавтов. Обычные весы, как известно, для этого непригодны.

Графическое представление гармонического колебания. Гармоническое колебательное движение становится особенно наглядным, если представить его графически, т. е. в виде графика зависимости координаты колеблющегося тела от времени. Изобразить такой график можно «поручить» самому колеблющемуся телу. Для этого к нему прикрепляют какое-нибудь пишущее устройство (карандаш, перо), а перед ним помещают бумажную ленту (рис. 11). Когда тело колеблется, оно проводит на бумаге прямую линию. Каждую точку этой прямой тело проходит за период колебания дважды — на пути вверх и вниз. Но если мы хотим зафиксировать положение колеблющегося тела в различные моменты времени, нужно, чтобы перо не касалось одной и той же точки более одного раза. Для этого нужно бумажную ленту двигать с некоторой постоянной скоростью в направлении, перпендикулярном направлению колебаний. На бумаге появится кривая, каждая точка которой соответствует положению пера, а значит, и колеблющегося тела в различные моменты времени. На рисунке 12 эта кривая показана отдельно. Такую кривую мы получим, если начнем двигать бумагу в тот момент, когда тело проходит положение равновесия. Напомним, что такая кривая называется синусоидой. Теперь мы ее получили опытным путем.

Выше мы говорили (см. § 1), что пружинный маятник совершает гармонические колебания. Мы можем утверждать теперь, что графиком зависимости координаты от времени в гармонических колебаниях является синусоида.

Вычерчивая такие графики колебаний, мы, как говорят, «развертываем» их во времени. Равномерное движение бумаги как бы символизирует течение времени. Такие развертки очень наглядно показывают основные характеристики колебательного движения — амплитуду, период, а значит, и частоту (см. рис. 12).

Вопросы

1. При каких условиях маятник в виде груза, подвешенного на нити, можно считать математическим?
2. При каких условиях колебания маятника будут гармоническими?
3. От каких величин зависит период колебаний маятника?
4. Изменится ли период колебаний маятника, если перенести маятник из одного места на Земле в другое?
5. Как изменится период колебаний маятника, если заменить груз на нем другим, по массе вдвое меньшим? вдвое большим?

Пример решения задачи

Ученик измерял ускорение свободного падения с помощью математического маятника. Длина нити маятника, которым он пользовался, была 100 см. Этот маятник совершил 30 колебаний за 60 с. Какое значение ускорения получил ученик по данным своих измерений?

Решение. Из формулы $T=2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ находим, что $g=\frac{4\pi^2 l}{T^2}$.

Из условия задачи следует, что $T=\frac{60\text{ с}}{30}=2$ с. Значит,

$$g=\frac{4\cdot(3{,}14)^2\cdot 1\text{ м}}{4\text{ с}^2}\approx 9{,}86\text{ м/с}^2.$$

Упражнение 2

1. Маятник совершает 24 колебания за 30 с. Чему равны период и частота его колебаний?
2. Чему должна быть равна длина подвеса маятника, чтобы период его колебаний был равен 1 с? 2 с?
3. В Исаакиевском соборе в Ленинграде висит маятник с длиной подвеса 98 м. Каков период его колебаний? Чему равна амплитуда его колебания, если он отклонен от вертикали на 5° (0,087 рад)?
4. Маятник на поверхности Земли колеблется с периодом 2 с. Каков будет период колебания этого маятника на поверхности Луны? Ускорение свободного падения у поверхности Луны в 6 раз меньше, чем у поверхности Земли.

5. Свободные колебания. Затухание колебаний

Колебания, которые происходят сами по себе. Колебания груза, прикрепленного к пружине, или груза на нити происходят как бы сами по себе. Достаточно для этого только вывести грузы из положения равновесия — слегка оттянуть груз пружинного маятника или немного отклонить от вертикального положения математический маятник. Сами по себе — это значит, что колебания маятников не принуждались к этому действием внешних сил; они происходят только благодаря силам, действующим внутри самой системы тел: силе упругости в пружинном маятнике или силе тяжести и силе упругости нити в математическом маятнике[1].

[1] В систему тел нитяного маятника входит и Земля, так как она является «источником» силы тяжести, действующей на груз.

Колебания, которые происходят без внешних воздействий, после того как тело выведено из состояния равновесия, называются *свободными.*

Системы тел, которые способны совершать свободные колебания, называются *колебательными системами.*

Частоту свободных колебаний называют также *частотой собственных колебаний системы.*

Формулы для периодов колебаний, которые были получены в § 3 и 4, относятся именно к свободным колебаниям.

Итак, пружинный и математический маятники совершают свободные колебания. И не только они. Такие колебания широко распространены в природе.

Познакомившись с колебаниями маятников, нам нетрудно сообразить, при каких же условиях возможны свободные колебания тел. Во-первых, в колебательной системе должны действовать «похожие» друг на друга силы. В пружинном маятнике — это сила упругости, проекция которой на координатную ось пропорциональна деформации пружины, т. е. смещению тела ($F_x = -kx$). Эта сила направлена к положению равновесия. В нитяном маятнике — это равнодействующая сил тяжести и упругости, проекция которой тоже пропорциональна смещению тела $\left(F_x = -\frac{mg}{l}x\right)$, и эта сила тоже направлена к положению равновесия. Во-вторых, трение в системе должно быть достаточно мало, иначе колебания быстро прекратятся или даже не возникнут.

Сколько времени длятся свободные колебания? Толкнув покоящийся маятник или подняв его на некоторую высоту, мы сообщаем ему энергию: в первом случае — кинетическую, а во втором — потенциальную. А далее, при колебательном движении энергия тела будет попеременно переходить из кинетической в потенциальную и обратно. При отсутствии трения полная механическая энергия маятника должна оставаться все время равной той энергии, которая была ему сообщена вначале.

В § 1 мы видели, что полная энергия колеблющегося тела определяется квадратом амплитуды колебания. Значит, при отсутствии трения, когда полная механическая энергия маятника сохраняется, остается постоянной и амплитуда колебаний. Следовательно, свободные колебания должны длиться вечно. И действительно, иногда можно наблюдать колебания, длящиеся поразительно долго. Например, длинный маятник, отклоненный на малый угол, может в течение многих часов совершать свои колебания.

Все же свободные колебания невечны. Но как бы долго ни продолжались свободные колебания, их амплитуда, как показывает опыт, постепенно уменьшается, колебания, как говорят, затухают и в конце концов прекращаются. В чем причина затухания колебаний?

Причина состоит в том, что в реальных земных условиях при

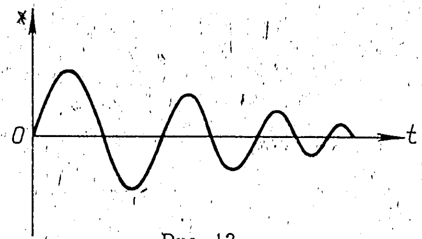


Рис. 13

колебательном движении, как и во всех других видах движения, нельзя исключить действие силы трения. А трение все совершенно меняет. Сила трения направлена в сторону, противоположную движению, поэтому она совершает отрицательную работу. А раз работа отрицательная, то полная механическая энергия уменьшается. Уменьшение энергии означает уменьшение амплитуды. Колебания, амплитуда которых с течением времени уменьшается, называются *затухающими.* С каждым новым периодом амплитуда становится все меньше, и, чем больше сила трения, тем быстрее уменьшается амплитуда. На рисунке 13 показан график такого затухающего колебания. Затухающие колебания гармоническими считать нельзя, так как для гармонических колебаний характерно постоянство амплитуды.

Вопросы

1. Какие колебания называются свободными?
2. В чем состоит явление затухания колебаний?
3. Почему сила трения приводит к уменьшению амплитуды колебаний?
4. Можно ли считать затухающие колебания гармоническими?

6. Вынужденные колебания

Для того чтобы колебания были незатухающими, необходимо восполнять потери энергии на трение за каждый период колебания.

Восполнять энергию колебательной системы можно, действуя на нее внешней периодически изменяющейся силой. Энергия системы пополняется за счет работы этой внешней силы. Колебания тел в этом случае уже не будут свободными, они будут вынужденными; периодически изменяющаяся сила, вызывающая эти колебания, называется *вынуждающей силой.*

Вынужденными колебаниями называются колебания, совершаемые телом под действием внешней периодически изменяющейся силы.

Вынужденные колебания совершает, например, груз, скрепленный с пружинами, если на свободный конец одной из пружин действует периодически изменяющаяся сила (рис. 14). Для того чтобы груз не провисал, его прикрепили к блоку, скользящему вдоль рейки. Периодическое действие силы достигается тем, что конец пружины привязан к стержню, укрепленному на диске центробежной машины. При вращении диска нить действует на конец пружины с некоторой силой, изменяющейся с частотой вращения диска ν. Поэтому и тело приходит в колебания именно с этой частотой, а не с частотой собственных колебаний ν_0. Вы-

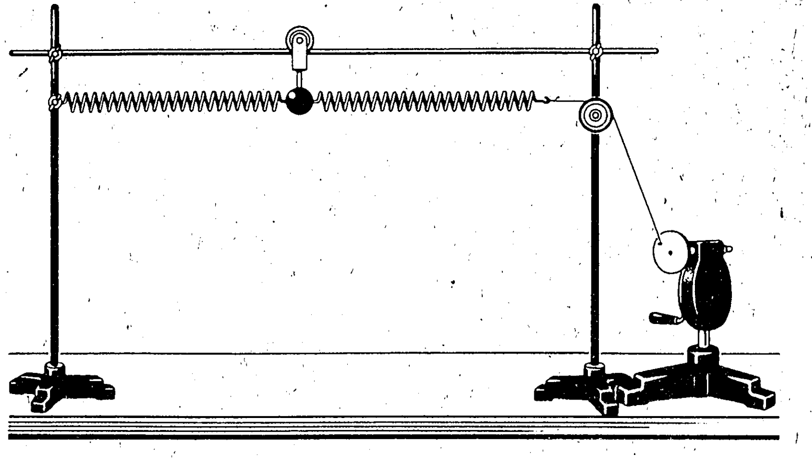


Рис. 14

нуждающая сила «навязывает» свою частоту колеблющемуся телу. ***Вынужденные колебания происходят с частотой вынуждающей силы.***

Резонанс. Особый интерес представляет случай, когда частота вынуждающей силы совпадает или близка к частоте собственных колебаний тела. Рассмотрим опыт, в котором легко можно изменять частоту вынуждающей силы, действующей на колебательную систему. На рисунке 15 изображена установка, состоящая из маятника A с постоянной длиной нити и маятника B, длину которого можно изменять, подтягивая рукой свободный конец нити. Оба маятника прикреплены к одной и той же веревочной растяжке. Поэтому если привести в колебания маятник B, то он через растяжку будет действовать с некоторой периодической силой на маятник A, который вследствие этого начнет совершать вынужденные колебания.

Уменьшая длину маятника B, мы тем самым изменяем частоту его колебаний, а следовательно, и частоту вынуждающей силы, действующей на маятник A. При этом мы заметим, что, когда частота вынуждающей силы приближается к собственной частоте колебаний маятника A (длины маятников становятся равными), амплитуда колебаний маятника A резко возрастает. Максимального значения амплитуда вынужденных колебаний достигает при совпадении частоты ν колебаний вынуждающей силы и собственной частоты ν_0 колебательной системы ($\nu=\nu_0$). Сила трения, однако, здесь играет большую роль, и именно она мешает амплитуде достигать

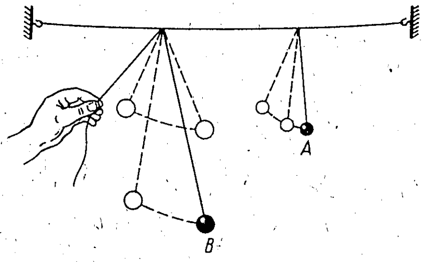


Рис. 15

слишком больших значений. Но все же при равенстве частоты колебаний вынуждающей силы собственной частоте колебаний системы амплитуда может оказаться весьма значительной[1]. Явление резкого возрастания амплитуды вынужденных колебаний при равенстве частоты колебаний вынуждающей силы и собственной частоты колебательной системы называется *резонансом.*

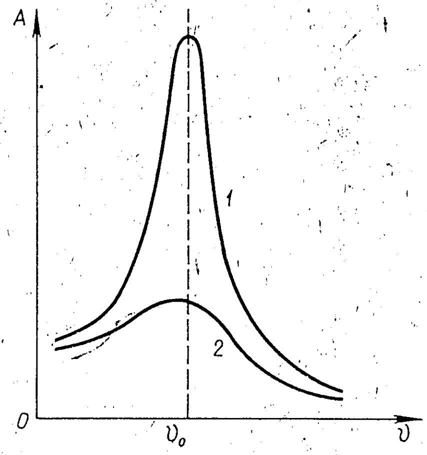


Рис. 16

На рисунке 16 показана зависимость амплитуды вынужденного колебания от частоты ν колебаний вынуждающей силы. Видно, что эта амплитуда достигает максимума при определенном значении частоты $\nu=\nu_0$, где ν_0 и есть собственная частота колебательной системы. На рисунке у кривой *1* максимум очень резкий. Это соответствует малой силе трения. При большей силе трения такого резкого максимума нет (кривая *2*).

Как можно объяснить явление резонанса? Хорошо известно, что, например, при раскачивании качелей необходимо подталкивать их, действуя хотя и небольшой внешней силой, но «в такт» с собственными колебаниями качелей. «В такт» — это значит, что направление действующей силы (толчка) совпадает с направлением движения качелей. Поэтому внешняя сила совершает положительную работу, увеличивая с каждым новым толчком энергию качелей, и амплитуда их колебаний возрастает. То же самое происходило в опыте с маятником (см. рис. 15), когда маятник B через растяжку действовал на маятник A «в такт» с частотой собственных колебаний маятника A. При совпадении частот колебаний вынуждающей силы и собственной частоты системы происходит передача максимальной энергии колебательной системе. Поэтому амплитуда резко возрастает.

Резонанс может быть полезным, поскольку он позволяет увеличивать, если это нужно, амплитуду колебаний. С другой стороны, резонанс может быть вредным и даже опасным явлением. Если, например, на фундаменте установлена машина, в которой во время ее работы какие-нибудь части совершают периодические движения, то они передаются фундаменту и он будет совершать вынужденные колебания. Фундамент имеет тоже определенную собственную частоту. И если она совпадет с частотой колебаний в машине, то амплитуда колебаний фундамента может стать настолько большой, что это приведет к его

[1] Трение является также причиной того, что максимальное значение амплитуды достигается при не вполне точном совпадении частот ν и ν_0.

разрушению. Известны случаи, когда мосты разрушались при прохождении по ним военных отрядов, потому что случайно собственная частота колебаний моста оказывалась равной частоте солдатского шага. Борьба с опасными последствиями резонанса сводится к тому, что его стараются не допускать. Для этого нужно заранее рассчитать частоты колебаний машин, фундаментов, средств транспорта и т. д., с тем чтобы при обычных условиях их эксплуатации резонанс не мог наступить.

С явлением резонанса мы часто встречаемся в повседневной жизни. Если в комнате задребезжали стекла при прохождении тяжелого грузовика по улице, то это значит, что собственные частоты колебаний стекол равны частотам колебаний машины. Вообще всякое дребезжание обычно связано с резонансом. Резонанс можно наблюдать и в опыте, о котором мы говорили в связи с изучением вынужденных колебаний (см. рис. 14). Изменяя частоту колебаний вынуждающей силы (с помощью центробежной машины), можно заметить, что при разных частотах этих колебаний амплитуда колебаний груза будет различна. Можно подобрать и такую частоту, при которой амплитуда будет особенно большой. Это и означает, что наступил резонанс.

Вопросы

1. Что такое вынужденные колебания?
2. С какой частотой происходят вынужденные колебания?
3. В чем состоит явление резонанса?
4. Какова роль силы трения при вынужденных колебаниях?

Упражнение 3

На конец пружины горизонтального маятника (см. рис. 14), груз которого имеет массу 1 кг, действует переменная сила, частота колебаний которой равна 16 Гц. Будет ли при этом наблюдаться резонанс, если жесткость пружины 400 Н/м?

Глава 2.

Волны

Колебания передаются от точки к точке

Многим, наверное, приходилось видеть некошеное поле в ветреную погоду, когда, по словам поэта, «волнуется желтеющая нива». Глядя на такое поле, мы видим, что вдоль него что-то перемещается, но, что именно перемещается, неясно. Ведь стебли травы или злаков остаются на месте. Они лишь наклоняются, выпрямляются, снова наклоняются и т. д. Наблюдаемый нами процесс представляет собой *волну*.

Поместим на поверхность воды в сосуде легкий поплавок. Осторожно добавим еще один. Появление второго поплавка

никак не отражается на первом. Можно считать, что взаимодействия между ними нет. А теперь легкими нажатиями заставим один из поплавков совершать колебания. К этому второй поплавок «не останется равнодушным». Через некоторое время начнет колебаться и он. Но при этом мы увидим, что от поплавка, который мы привели в колебательное движение, по воде «пошли круги». Эти круги тоже называются *волнами*.

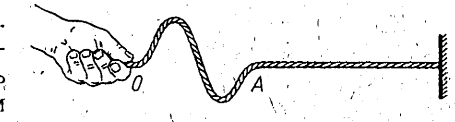


Рис. 17

Еще один пример. Один конец длинного шнура закрепим в опоре, а другой конец приведем в колебательное движение (рис. 17). Мы увидим, что вдоль шнура что-то «бежит». Но оба конца остаются на месте. То, что «бежит» вдоль шнура, также называется волной (ее так и называют «бегущая волна»).

7. Что такое волна?

Что же распространяется вдоль поля, по воде, вдоль шнура?

Нетрудно заметить, что во всех трех наших примерах источником волн являются *колебания*. Колеблются стебли, деформированные ветром, колеблются частицы на поверхности воды, которая тоже деформирована поплавком, колеблется конец деформированного шнура. Вслед за первой начавшей колебаться частицей (например, частицей у конца шнура) в колебательное движение приходят одна за другой связанные с ней силами упругости ее соседи, которые повторяют те же колебания, но с некоторым запаздыванием. Например, к тому моменту времени, к которому относится рисунок 17, начали колебаться все точки от O до A. Точки же, находящиеся правее A, еще покоятся. До них еще не дошла «очередь». То, что мы называем волной, и есть *распространение колебаний от точки к точке.*

Хорошей моделью образования волны в шнуре может служить цепочка маленьких шариков (точек) массой m каждая, между которыми действует сила упругости. Мы можем вообразить, что между ними расположены маленькие пружинки (рис. 18).

Пусть точка *1* отведена вверх и таким образом нарушено ее равновесие. Пружинка, связывающая ее с точкой *2*, растянется, возникнет сила упругости, которая действует не только на точку *1*, но и на точку *2*. Начнет, следовательно, колебаться и точка *2*. Это приведет к растяжению следующей пружинки и т. д. Так как у всех шариков одинаковые массы и у всех пружинок одинаковые жесткости, то все точки (каждая около своего положения равновесия) будут колебаться с одинаковыми периодами и одинаковыми амплитудами. Однако начнутся эти колебания неодновременно. Ведь все шарики-точки обладают инертностью (у них есть масса!) и, значит, на изменение их скорости требуется время. Поэтому вторая точка начнет колебаться позже, чем первая, третья — позже, чем вторая, и т. д.

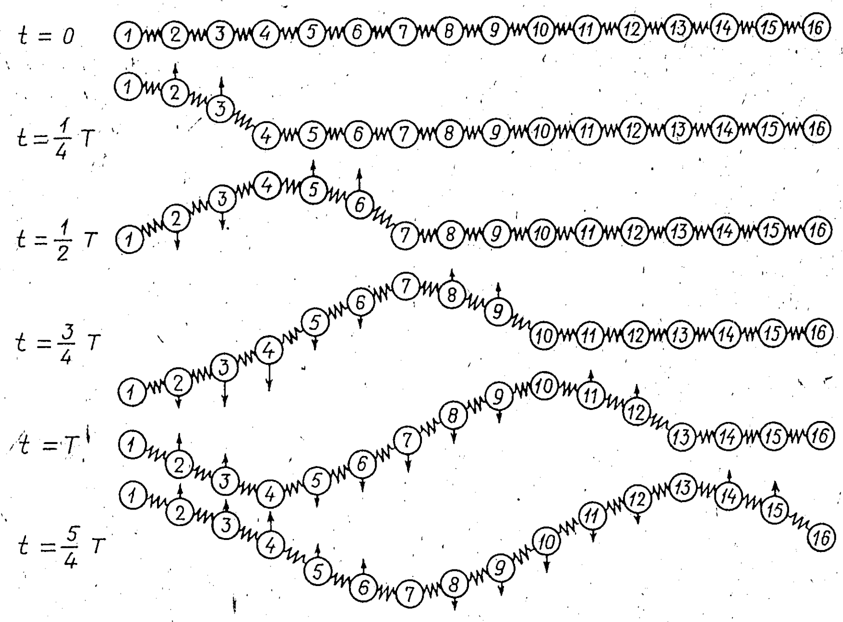


Рис. 18

Длина волны. Через промежуток времени, равный периоду колебания T, точка *1* завершит свое первое колебание. К этому времени соседняя точка *2* этого сделать не успеет, потому что она начала двигаться позже. Она и закончит свое первое колебание позже точки *1*. Еще позже это сделают точки *3, 4* и т. д. На некотором расстоянии от точки *1* находится точка, которая «опаздывает» с началом движения ровно на 1 период колебания. На нашем рисунке это точка *13*. Это значит, что за время, равное периоду колебания T, колебание «успело» распространиться до точки *13*. Таким образом, эта точка начнет свое первое колебание в тот момент, когда точка *1* начнет свое второе колебание. Обозначим это расстояние греческой буквой λ. Называется оно длиной волны. *Длиной волны* называется расстояние, на которое распространяется волна за время, равное периоду колебаний частиц.

Ясно, что точка, расположенная на расстоянии 2λ от точки *1*, начнет свое первое колебание в тот момент, когда точка *1* начнет свое третье колебание, а точка *13* — второе и т. д. Эти точки, следовательно, движутся одинаково: они одновременно начинают двигаться вверх, вместе проходят через положение равновесия, одновременно движутся вниз, одновременно заканчивают очередное колебание. И не только они, но и любые точки, отстоящие одна от другой на расстояниях, равных длине волны, двум длинам волн и т. д. Можно поэтому сказать, что длина волны равна расстоянию между двумя ближайшими точками в волне, движущимися одинаково и имеющими одинаковые отклонения от положения равновесия.

Скорость волны. Волна — это распространение колебаний в упругой среде. Ясно поэтому, что можно говорить о скорости этого распространения. Эта скорость называется *скоростью волны*. Мы только что видели, что за время, равное периоду T, колебание распространяется на расстояние, равное длине волны λ. Значит,

$$\lambda = vT. \quad (1)$$

Так как период T колебаний связан с частотой колебаний соотношением $T = \frac{1}{\nu}$, то $\lambda = \frac{v}{\nu}$, или

$$v = \lambda\nu. \quad (2)$$

Скорость волны ни в коем случае нельзя путать со скоростью движения колеблющихся частиц: ведь частицы не переносятся вместе с волной.

Волны и энергия. С колебаниями, как мы знаем, связана энергия. Напомним, что она пропорциональна квадрату амплитуды колебаний. Поэтому вместе с колебаниями волной переносится и энергия колебаний, хотя сами носители этой энергии, т. е. колеблющиеся частицы, с волной не переносятся. Таким образом, волна оказывается также и переносчиком энергии.

8. Два вида волн

Поперечная волна. В § 7 мы рассмотрели возникновение волны на модели, представляющей собой цепочку шариков — точек, связанных между собой силами упругости пружинок. На этой модели мы видели, как распространяются колебания, вызванные тем, что первая в цепи точка была отведена вверх, т. е. так, чтобы эта точка колебалась вдоль вертикальной прямой. Колебания же распространялись по горизонтальной линии. Волны, в которых колебания частиц происходят перпендикулярно направлению распространения волны, называются *поперечными*.

Чтобы возникла поперечная волна, необходима деформация пружины, т. е. между частицами должна действовать сила упругости. Именно это и происходит, когда мы «пускаем волну» вдоль шнура (см. рис. 17). При распространении поперечной волны цепочка изменяет свою форму; это хорошо видно в опыте с волной, распространяющейся вдоль шнура. На нем появляются горбы и впадины. Длина волны соответствует расстоянию между двумя ближайшими горбами или впадинами (рис. 19).

Продольная волна. Но волну вдоль цепочки можно вызвать и иначе. Мы могли бы отвести первый шарик не вверх или вниз, а влево или вправо. Это тоже заставило бы его колебаться, и эти колебания также распространялись бы вдоль всей цепочки. Однако в этом случае прямая, вдоль которой происходят колебания, совпадает с прямой, вдоль которой эти колебания распространяются. При этом образуются не горбы и впадины, как в поперечной волне, а сгущения и разрежения шариков (рис. 20). Волны, в которых колебания частиц происходят вдоль линии их распростра-

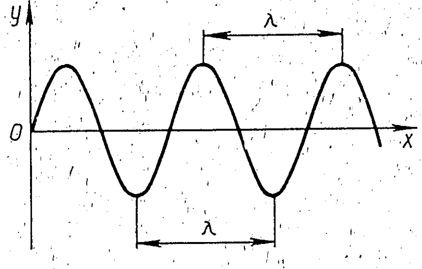


Рис. 19

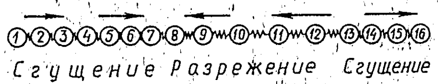


Рис. 20

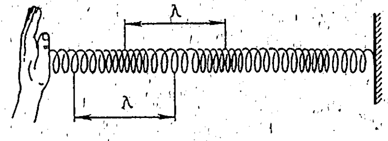


Рис. 21

нения, называются *продольными.* Образование продольной волны можно наблюдать, вызвав колебания одного конца пружины (рис. 21). Толкнув конец пружины, мы создаем в этом месте сгущение витков, которое «бежит» по пружине. Эти сгущения чередуются с разрежениями, которые тоже перемещаются вдоль пружины.

Формулы, связывающие длину волны с ее скоростью, частотой и периодом колебаний, относящиеся к поперечной волне, справедливы и для продольной волны. Длина продольной волны соответствует расстоянию между двумя ближайшими сгущениями или разрежениями звеньев пружины (см. рис. 21).

Механические волны в природе. Волны, наблюдаемые в природе, переносят огромную энергию. Так, например, морские волны, обладающие большой мощностью, бывают причиной гибели кораблей в море.

Но энергию морских волн можно было бы использовать на благо человеку, если создать устройства, позволяющие преобразовывать ее в электрическую энергию. Подобные преобразователи энергии позволили бы более экономно использовать такие невозобновляемые источники энергии, как нефть, газ, каменный уголь, а, кроме того, они не загрязняли бы окружающую среду.

В природе, однако, встречаются волны, которые приносят только бедствия. Это волны, распространяющиеся в земной коре при землетрясениях. Они называются *сейсмическими.* При землетрясениях происходят сдвиги (вертикальные перемещения) земной коры, достигающие 10—15 м. Предотвратить землетрясения невозможно. Но важно уметь предсказывать их приближение, чтобы вовремя предупредить людей. Для этого нужно иметь прибор — *сейсмограф,* который способен регистрировать очень слабые сейсмические волны, предшествующие землетрясению.

Сейсмограф представляет собой прибор, действие которого подобно устройству для записи графика колебаний пружинного маятника (см. рис. 11). При колебаниях почвы возникают колебания корпуса прибора, на котором укреплен груз, висящий на пружине. Скрепленное с маятником пишущее устройство фиксирует колебания почвы на вращающемся барабане.

По записи колебаний почвы можно судить о начинающемся землетрясении, его силе и расстоянии до очага землетрясения.

Вопросы

1. Что такое волна? При каком условии возможно распространение волны?
2. Как связаны между собой скорость волны, ее длина и частота колебаний частиц в волне?
3. Как связаны между собой скорость, длина волны и период колебаний частиц в волне?

Упражнение 4

1. Волны набегают на берег, и каждые 10 с береговую линию пересекают 4 волны. Какова скорость волны, если расстояние между их гребнями 8 м?
2. Волна с частотой колебаний 165 Гц распространяется со скоростью 330 м/с. Чему равна длина волны?

Глава 3.

Звуковые волны

Человек живет в мире звуков

Звуки — это то, что слышит ухо. Мы слышим голоса людей, пение птиц, звуки музыкальных инструментов, шум леса в ветреную погоду, шум прибоя морских волн, гром во время грозы. Звучат работающие машины, движущийся транспорт и т. д. Раздел физики, в котором изучаются звуковые явления, называется акустикой.

9. Распространение звука — звуковые волны

Источники звука — колеблющиеся тела. Легко убедиться в том, что источники звука — это колеблющиеся тела. Это видно хотя бы из наблюдения за звучащей струной музыкального инструмента. Во время звучания она как бы утолщается, особенно в середине. Вид струны изменился именно вследствие ее колебаний.

При изучении звуковых явлений пользуются в качестве источника звука специальным прибором — камертоном. Он представляет собой изогнутый металлический стержень на ножке. Ножка камертона обычно закрепляется на деревянном ящике (назначение ящика мы выясним в дальнейшем).

Ударив по ветви камертона молоточком, мы услышим чистый музыкальный звук. Поднеся маленький шарик к звучащему камертону, заметим, что шарик отскакивает от него (рис. 22). Это доказывает, что ветви звучащего камертона колеблются.

И здесь, как и в случае колебаний маятника, можно «поручить» камертону самому записать свои колебания. Для этого прикрепим к одной ветви камертона острие и быстро проведем им по закопченной пластинке (рис. 23, *а*). Мы увидим уже знакомую нам синусоидальную линию (рис. 23, *б*). Значит, ножки камертона совершают гармонические колебания.

Между источником звука и ухом, воспринимающим звук, находится какая-то среда, обладающая упругостью, чаще всего воздух. Именно в этой среде распространяются колебания от источника звука — звуковые волны, которые воздействуют на барабанную перепонку уха. Ее колебания и воспринимаются как звук.

Наличие какой-либо материальной среды для передачи звука обязательно. Если откачать воздух из-под колокола воздушного насоса, то мы не услышим звучания находящегося там электрического звонка.

Как же образуются звуковые волны? Когда колеблются, например, стенки колокольчика, они толкают частицы среды в направлении своего отклонения и создают в этом месте сгущение частиц воздуха. В следующую же половину периода сгущения сменяются разрежениями среды в данном месте. Эти сгущения и разрежения будут распространяться по линии колебаний стенок колокольчика (рис. 24).

Звуковая волна в воздухе, следовательно, представляет собой продольную волну, в ко-

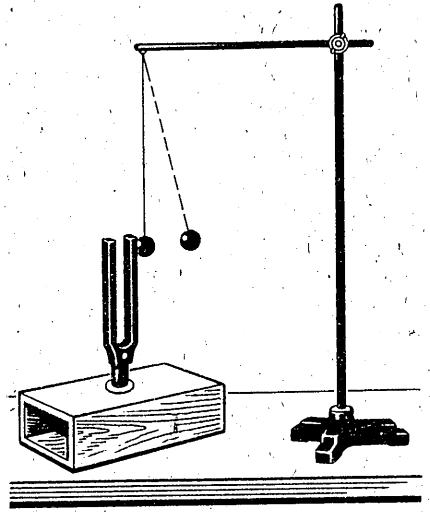
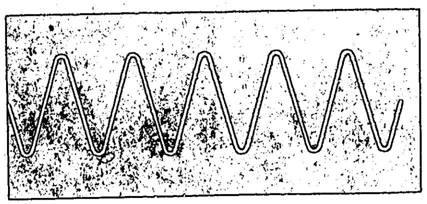


Рис. 22

а



б

Рис. 23

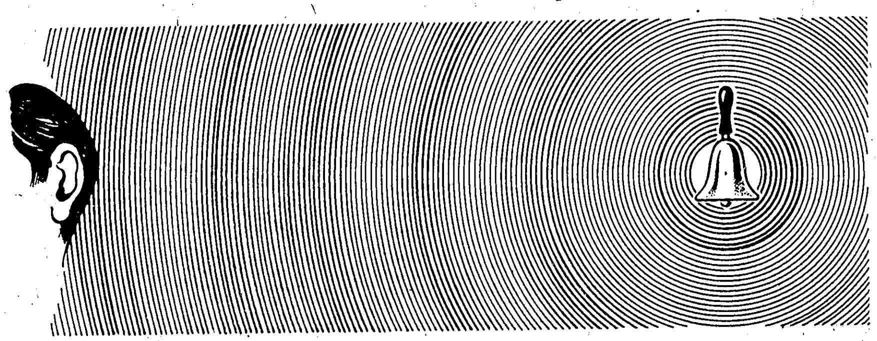


Рис. 24

Скор. света

торой колебания частиц происходят вдоль ее распространения.

Звук может распространяться также и в жидкой, и в твердой среде. Тот, кто нырял в реку или море, знает, что под водой хорошо слышны звуки гребных винтов теплоходов, удары камней и др. Звук движущегося поезда хорошо слышен, если приложить ухо к рельсу. По земле хорошо передается звук от удара копыт лошади мчащегося вдали всадника.

Колебания частиц в жидкостях вызываются силами упругости при сжатии и расширении жидкости. Поэтому звуковые волны в жидкостях — это тоже продольные волны. Но в твердых телах звуковые волны могут быть и поперечными. Это связано с тем, что в твердом теле возможны и деформации другого вида — не только сжатия и растяжения. Если ударить по концу стержня не вдоль, а поперек его длины, то это приведет к сдвигу одних слоев стержня относительно других. Такую деформацию называют сдвигом. При этой деформации тоже возникают силы упругости, восстанавливающие форму стержня. В этом случае возникают колебания, распространяющиеся в виде поперечной волны. Деформации сдвига внутри жидкостей и газов не происходят. В этих средах распространяются только продольные звуковые волны.

Скорость звука. Гром мы всегда слышим с некоторым запаздыванием (иногда достигающим десятков секунд) после блеска молнии. Но гром и молния возникают, разумеется, одновременно. Почему же мы слышим его позднее, чем видим молнию? Очевидно, это связано с тем, что скорости звука и света различны. Свет распространяется почти мгновенно — его скорость огромна — 300 000 км/с. Скорость же звука значительно меньше.

Чему равна эта скорость?

Скорость звука легко определить именно потому, что свет распространяется почти мгновенно, а звук со значительно меньшей скоростью. Для измерения скорости звука нужно иметь источник, издающий одновременно звук и излучающий свет. Таким источником может быть, например, артиллерийское орудие.

На определенном, точно измеренном от орудия расстоянии должен находиться наблюдатель. С помощью секундомера он фиксирует момент начала распространения звука по вспышке от выстрела и момент восприятия звука. Скорость распространения звука определяют, разделив расстояние от источника звука до наблюдателя на время распространения звука. Эта скорость оказалась зависящей от температуры, и при 0 °C в воздухе она равна 331 м/с. Измерения скорости звука в различных средах показали, что в твердых телах и в жидкостях она значительно больше, чем в воздухе.

Громкость звука. Звуки, издаваемые камертоном или другими гармонически колеблющимися телами, называются музыкальными звуками. Воспринимая музыкальные звуки, мы легко улавливаем различия между ними. Так, изменяя силу удара молоточком по камертону, мы будем слышать звуки, отличающиеся по громкости. Но мы знаем, что, чем сильнее мы ударяем, тем больше амплитуда колебаний ветви камертона. При увеличении амплитуды колебаний звучащего тела увеличивается и амплитуда колебаний в звуковой волне. Значит, *громкость звука зависит от амплитуды колебаний звучащего тела, но эта зависимость не прямопропорциональная.* Однако чувствительность нашего уха к восприятию громкости звука зависит, кроме того, от частоты колебаний в звуковой волне. При равной амплитуде как более громкие мы воспринимаем звуки, частота которых лежит в пределах от 1000 до 5000 Гц.

Тон звука. Музыкальные звуки отличаются не только громкостью. Мы легко, например, различаем низкие (бас) и высокие (сопрано) голоса певцов. Камертоны различного размера издают также звуки различного тона. От чего же зависит высота тона?

Возьмем два камертона, издающие звуки разного тона, и запишем графики их колебаний (рис. 25). Сопоставление этих графиков со звучаниями камертонов показывает, что более высокому тону соответствует бо́льшая частота колебаний камертона (нижняя синусоида). Следовательно, *высота тона определяется частотой колебаний.*

Человек воспринимает как звуки колебания с частотой от 16 до 20 000 Гц. Звуки человеческого голоса могут быть как низкого тона — басы (80—350 Гц), так и самого высокого тона — колоратурное сопрано (330—1400 Гц).

Различные шумы отличаются от музыкальных звуков тем, что им не соответствует какая-нибудь определенная частота колебаний.

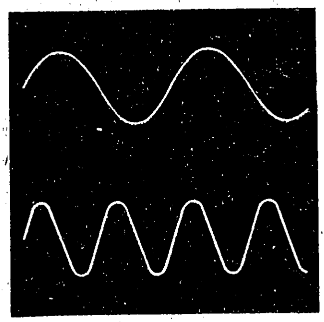


Рис. 25

Механические колебания с частотой более 20 000 Гц называются ультразвуками.

Скорость ультразвуков такая же, как и у обычного звука. А из формулы $\lambda = \frac{v}{\nu}$ следует, что длины ультразвуковых волн намного меньше, чем у обычного звука. Главная особенность ультразвуковых волн состоит в том, что их можно сделать остронаправленными, т. е. распространяющимися по определенному направлению от источника. Эта их особенность находит широкое применение в технике.

Вопросы

1. Как направлены колебания частиц воздуха в звуковой волне по отношению к линии ее распространения?
2. От чего зависит высота тона?
3. От чего зависит громкость звука?
4. Звуки низкого или высокого тона имеют бо́льшую длину волны в данной среде?

10. Звуковые явления

Акустический резонанс. Резонанс, который мы наблюдали в опыте с двумя маятниками, висящими на общей растяжке (см. рис. 15), имеет место и в звуковых колебаниях.

Установим рядом два камертона, имеющих одинаковую собственную частоту колебаний.

Ударом молоточка заставим звучать один из этих камертонов, например левый. Зажав рукой ветви этого камертона и прекратив тем самым его звучание, мы услышим звучание второго камертона. Почему он звучит, ведь его колебания не возбуждались ударом молоточка? Очевидно, здесь все происходит так же, как и в опыте с вынужденными колебаниями маятника: второй маятник совершал колебания благодаря воздействию на него первого, которое передавалось по соединяющей их растяжке. Так же и ветви второго камертона пришли в колебательное движение под действием дошедших до него звуковых волн, созданных колебаниями первого камертона.

Изменим частоту собственных колебаний второго камертона, прилепив к одной из его ветвей кусочек пластилина. В этом случае он не будет отзываться на колебания первого камертона: заглушив звук первого камертона, мы уже не услышим звучания второго. В первом случае частоты собственных колебаний камертонов совпадали, поэтому возник резонанс: амплитуда колебаний второго камертона была достаточно велика, чтобы звучание было слышно. Во втором же случае, когда частоты колебаний не совпадали, резонанс отсутствовал и звука второго камертона слышно не было.

Резонируют не только камертоны. На колебания камертона отзывается не только другой камертон, но, например, и воздушные столбы в трубах. Поднесем звучащий камертон к стеклянной трубке, опущенной в сосуд с водой (рис. 26). Поднимая или опуская трубку, мы изменяем длину столба воздуха в ней. При некоторой длине воздушного столба мы услышим довольно сильное его звучание. Если увеличить или уменьшить длину столба воздуха в трубке, то его звучание ослабнет. Очевидно, что наиболее громкое звучание воздушного столба наступает, когда частота его колебаний совпадает с частотой колебаний камертона. Это и есть условие резонанса. Такая закрытая с одного конца трубка, создающая условие для резонанса, называется резонатором.

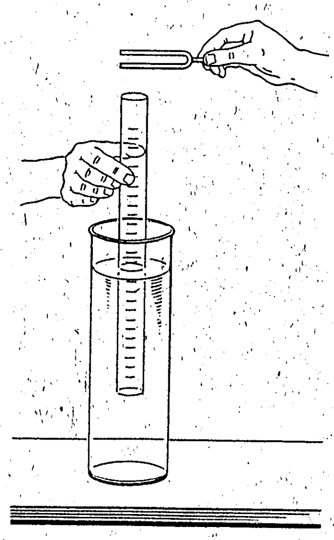


Рис. 26

Теперь легко понять, почему камертоны укрепляют на ящиках, открытых с одного конца. Такие ящики определенного размера для каждого камертона служат резонаторами, усиливающими их звучание (см. рис. 22). Резонаторами служат также трубы духовых инструментов, трубы органа, корпуса скрипок и других струнных инструментов.

Человек также имеет собственный резонатор — это полость рта, усиливающая издаваемые звуки.

Отражение звука. Эхо. С некоторыми звуковыми явлениями мы знакомы с детства. К ним относится прежде всего эхо. Эхо мы слышим как звук, отраженный от преград — гор, леса, стен больших зданий. Но эхо образуется только в том случае, когда отраженный звук воспринимается раздельно от первоначально произнесенного звука. Человеческое ухо воспринимает раздельно следующие один за другим звуки, если промежуток между ними составляет не менее $\frac{1}{15}$ с. Значит, эхо мы можем слышать, если расстояние до преграды (s) не менее того, которое звук проходит туда и обратно (т. е. расстояние $2s$) за $\frac{1}{15}$ с. Так как скорость звука в воздухе известна, то это расстояние легко рассчитать:

$$v=\frac{2s}{t}, \text{ откуда } s=\frac{vt}{2}.$$

Применение эхо. Эхолокация. Известно, что летучие мыши легко ориентируются в темноте, не натыкаясь на окружающие предметы, и даже в темноте ловят добычу. Такой же способностью обладают дельфины, ориентирующиеся в мутной воде. Что же заменяет им зрение в этих случаях?

Оказывается, что эти и некоторые другие животные обладают органами, испускающими ультразвуки и воспринимающими их после отражения от препятствий. Острая направленность ультразвука позволяет им определять местоположения и расстояния до встречных предметов по времени запаздывания отраженного звукового сигнала.

Явления отражения ультразвука от препятствий используются в судоходстве для определения расстояний до морского дна, местоположения айсбергов, встречных судов в тумане или ночью, для обнаружения косяков рыб и т. д.

Способ определения местоположения тел по отраженным от них ультразвуковым сигналам носит название *эхолокации*. С помощью специальных приборов — *эхолокаторов* определяют положение подводных лодок, а также с подводных лодок — положения надводных кораблей. Эхолокатор состоит из

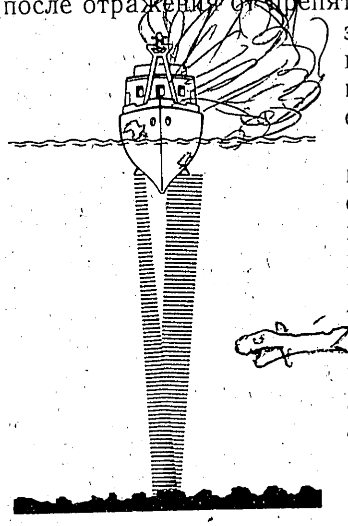


Рис. 27

источника, излучающего ультразвуковые сигналы, и их приемника, укрепленных на дне судна (рис. 27). Кроме того, эхолокатор содержит устройство, по которому определяют время запаздывания отраженного сигнала.

Ультразвук используется также для обнаружения и определения местоположений различных повреждений в деталях машин (пустоты, трещины, посторонние включения).

В медицине ультразвук используют для обнаружения различных аномалий в теле больного (опухоли, искажения формы органов или их частей и т. д.) и установления характера заболевания. Ультразвук используется и для лечения многих заболеваний.

Вопросы

1. Что такое акустический резонанс?
2. Для чего ножку камертона укрепляют на деревянном ящике?
3. Как можно обнаружить явление акустического резонанса?
4. Что такое эхо?
5. На любом ли расстоянии от преграды можно слышать эхо?
6. Как определить расстояние до преграды с помощью эхо?
7. Какие вы знаете практические применения явления эхо?

Упражнение 5

1. Наблюдатель услышал свисток тепловоза через 2 с после того, как он заметил струю пара, сопровождающего звук свистка. На каком расстоянии находился наблюдатель от тепловоза в момент подачи звукового сигнала? (Скорость звука в воздухе в этой и последующих задачах принять равной 340 м/с.)
2. На каком минимальном расстоянии от преграды может быть услышано эхо?
3. Какова глубина моря, если посланный и отраженный от морского дна ультразвук возвратился через 1,2 с? Скорость звука в воде ≈ 1480 м/с.
4. Определить длины звуковых волн человеческого голоса с высотой тона: а) 80 Гц; б) 1400 Гц.

Лабораторная работа

Определение ускорения свободного падения при помощи маятника

Цель работы: вычислить ускорение свободного падения из формулы периода колебания математического маятника

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

Для этого необходимо измерить период колебания и длину маятника. Тогда из формулы (1) можно вычислить ускорение свободного падения:

$$g=\frac{4\pi^2 l}{T^2}. \quad (2)$$

Приборы: часы с секундной стрелкой, измерительная лента ($\Delta_л=0{,}5$ см).
Материалы: шарик с отверстием, нить, штатив с муфтой и кольцом.

40. 110.
15. 112.
5 120

Порядок выполнения работы

1. Установить на краю стола штатив. У его верхнего конца укрепить при помощи муфты кольцо и подвесить к нему шарик на нити. Шарик должен висеть на расстоянии 3—5 см от пола.

2. Отклонить маятник от положения равновесия на 5—8 см и отпустить его.

3. Измерить длину маятника мерной лентой.

4. Измерить время Δt 40 полных колебаний (N).

5. Повторить измерения времени Δt (не изменяя условий опыта) и найти среднее значение $\Delta t_{ср}$.

6. Вычислить среднее значение периода колебаний $T_{ср}$ по среднему значению $\Delta t_{ср}$.

7. Вычислить значение $g_{ср}$ по формуле

$$g_{ср} = \frac{4\pi^2 l}{T^2_{ср}}. \quad (3)$$

8. Найденные результаты занести в таблицу:

Номер опыта	l, м	N	Δt, с	$\Delta t_{ср}$, с	$T_{ср}=\frac{\Delta t_{ср}}{N}$	$g_{ср}$, м/с^2
1						
2						
3						

9. Сравнить полученное среднее значение $g_{ср}$ со значением $g=9{,}8$ м/с^2 и рассчитать относительную погрешность измерения по формуле

$$\varepsilon_g = \frac{|g_{ср}-g|}{g}.$$

Ответы к упражнениям

№ 1. 1. ≈ 3,2 Гц. 2. ≈ 30 Н/м. 3. 0,02 кг.
№ 2. 1. 1,25 с; 0,8 Гц. 2. ≈ 0,25 м; ≈ 1 м.
3. ≈ 20 с; ≈ 8,5 м. 4. ≈ 5 с.
№ 4. 1. 3,2 м/с. 2. 2 м.
№ 5. 1. 680 м. 2. ≈ 11,3 м. 3. ≈ 900 м. 4. ≈ 4,2 м; ≈ 0,24 м.

Оглавление

3 к.