



**Министерство образования и науки Российской Федерации  
Рубцовский индустриальный институт (филиал)  
ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет  
им. И.И. Ползунова»**

**В.В. Борисовский**

# **КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ**

## **(теория и практика)**

**Учебное пособие для студентов  
всех направлений**

**Рубцовск 2014**

ББК 530.1

Борисовский В.В. Колебания и волны (теория и практика): Учебное пособие для студентов всех направлений/ Рубцовский индустриальный институт.- Рубцовск, 2014. - 48 с.

Пособие представляет собой краткую теорию колебательных и волновых процессов. Приведены вопросы и задачи, которые возникают в нашей повседневной жизни, в природе и технике при рассмотрении колебаний и волновых процессов, с подсказками и подробными ответами.

Пособие предназначено для студентов всех направлений и может быть использовано старшеклассниками, преподавателями физики.

Рассмотрено и одобрено на заседании  
НМС РИИ  
Протокол № 2 от 20.03.14 г.

Рецензент:

к.т.н., доцент П.А. Люкшин

## Содержание

Предисловие	4
I. Колебательное движение	5
1.1. Пружинный маятник	6
1.2. Физический маятник	6
1.3. Математический маятник	6
1.4. Колебательный контур	6
1.5. Сложение колебаний	7
II. Волновые процессы	9
III. Вопросы и задачи	12
IV. Подсказки	26
V. Ответы и решения	29

## Предисловие

В природе и технике в нашей повседневной практической деятельности очень часто встречаются колебательные и волновые процессы. При колебательных процессах состояния системы или каких-либо явлений через определенные промежутки повторяются точно или почти точно. Если же колебательный процесс еще и распространяется с течением времени в пространстве, то в этом случае речь идет о распространении волны.

Рассмотрение колебаний не исчерпывается телами, подвешенными на нити или пружине. Колеблются здания и фундаменты станков и машин, балки и мосты, провода высокого напряжения и окружающий нас воздух, ветки деревьев, наше сердце. Все это – примеры механических колебаний, но понятие колебаний распространяется на многие другие процессы и явления - электромагнитные, химические, тепловые. Природа колебаний разная, а законы, описывающие эти колебания, одни.

Распространение колебаний в пространстве от точки к точке является волной. Волны возникают на поверхности морей и океанов и в их толще, в кристаллических телах, бегут по проводам, доносят до нас цвета и звуки. Существуют волны песчаные и на снегу. Землетрясения и океанские цунами – тоже волновое движение, только гигантских масштабов. Все эти волны разного происхождения математически схожи, т.е. могут быть описаны одними и теми же уравнениями.

Пособие написано в форме задач и вопросов с ответами и краткой теорией по разделу курса физики «Колебания и волны». Многие вопросы взяты из жизни и практической деятельности человека, и для их решения необходимы лишь элементарные знания по физике и сообразительность. На некоторые вопросы ответ найти сразу будет трудно; тогда следует посмотреть подсказку во второй части пособия. Если и в этом случае ответ не получен, то ответ можно посмотреть в конце. Сверить ответ необходимо и в том случае, когда вы справились с заданием самостоятельно. Возможно, ваше решение окажется более простым и изящным.

## I. Колебательное движение

Акустика, радиотехника, оптика и ряд других разделов науки и техники базируются на учении о колебаниях и волнах. В общем случае колебательными процессами являются процессы, точно и приблизительно повторяющиеся через одинаковые промежутки времени.

Физическая природа колебаний может быть разной, поэтому различают колебания механические, электромагнитные и другие. Однако, несмотря на различие природы колебательных процессов, все они описываются одинаковыми характеристиками и одинаковыми уравнениями.

В зависимости от характера воздействий на колеблющееся тело или процесс различают *свободные* (или *собственные*) *колебания* и *вынужденные колебания*. Свободные, или собственные, колебания совершаются за счет первоначально сообщенной энергии при последующем отсутствии внешних воздействий на колеблющуюся систему. Свободные колебания являются незатухающими, если не происходит рассеяния энергии в окружающее пространство. Однако реальные колебательные процессы являются затухающими, так как на колеблющиеся тела и процессы действуют силы сопротивления движению.

Вынужденные колебания совершаются под действием внешней периодически изменяющейся силы, которую называют вынуждающей.

Свободные колебания являются не только самыми распространенными, но и самыми важными в теории колебательных процессов. Условия возникновения и характер вынужденных колебаний в большинстве случаев зависят от характера собственных колебаний, свойственных данной колеблющейся системе.

Простейшим видом колебания являются гармонические колебания - колебания, при которых колеблющаяся величина изменяется со временем по закону синуса (косинуса). Гармонические колебания физической величины  $S$  описываются уравнением

$$S = A \sin(\omega_0 t + \varphi_0), \quad (1)$$

где  $A$  – максимальное значение колеблющейся величины, называемое амплитудой колебаний,  $\omega_0$  – круговая (циклическая) частота,  $\varphi_0$  – начальная фаза колебаний в момент времени  $t=0$ ,  $(\omega_0 t + \varphi_0)$  – фаза колебаний в момент времени  $t$ .

Если система, совершающая гармонические колебания, за промежуток времени  $T$ , называемый периодом колебания, совершает одно полное колебание, то фаза колебаний получает приращение  $2\pi$  и тогда круговая частота равна

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu, \quad (2)$$

где  $\nu = \frac{1}{T}$  – частота колебаний (число колебаний в единицу времени).

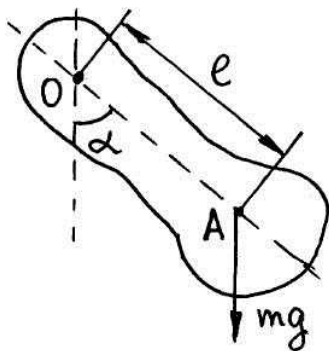
Примерами систем гармонических колебаний являются пружинный, физический и математический маятники и электрический колебательный контур, состоящий из конденсатора и катушки индуктивности. Определим периоды колебаний этих колебательных систем.

1.1. **Пружинный маятник** – груз массой  $m$ , подвешенный на пружине с коэффициентом упругости (жесткости)  $k$ . Этот маятник совершает гармонические колебания с периодом

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

Формула (3) справедлива для малых упругих колебаний в пределах, в которых выполняется закон Гука.

1.2. **Физический маятник** – твердое тело, совершающее колебания под действием силы тяжести вокруг горизонтальной оси  $O$ , не проходящей через центр масс  $A$  тела (рис.1). Период колебания такого маятника равен



$$T = 2\pi \sqrt{\frac{J}{mgl}}, \quad (4)$$

где  $J$  – момент инерции тела относительно оси колебаний, проходящей через точку  $O$ ,  $l$  – расстояние между точкой подвеса и центром масс маятника,  $m$  – масса тела,  $g$  – ускорение свободного падения.

Рис.1

1.3. **Математический маятник** – система, состоящая из материальной точки массой  $m$ , подвешенной на невесомой нерастяжимой нити, и колеблющаяся под действием силы тяжести. Хорошей моделью математического маятника является небольшой тяжелый шарик, подвешенный на тонкой длинной нити.

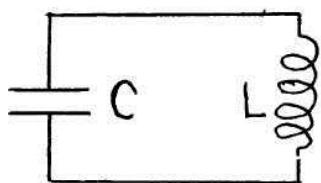
Так как момент инерции такого шарика на нити длиной  $l$  будет равен

$$J = ml^2, \quad (5)$$

то, подставив момент инерции шарика в формулу (4), получим выражение для малых колебаний математического маятника:

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

1.4. **Колебательный контур** – электрическая цепь, состоящая из включенных последовательно катушки индуктивностью  $L$ , конденсатора емкостью  $C$  и сопротивления  $R$  (рис.2). Электрические колебания в колебательном контуре сопровождаются превращениями энергий электрического и магнитного полей. Возникают в этом случае так называемые электромагнитные колебания. Период



собственных электромагнитных колебаний определяется по формуле:

$$T = 2\pi \sqrt{LC}. \quad (7)$$

Формула (7) была получена английским физиком У. Томсоном (1824-1905) и называется формулой Томсона.

Рис.2

Энергия механических гармонических колебаний складывается из кинетической  $E_k$  и потенциальной  $E_n$  составляющих. Значения обеих компонент энергии меняются периодически, но в каждый момент времени энергия системы, колеблющейся без затухания,  $E = E_k + E_n$  остается постоянной.

Рассмотрим определение энергии при гармоническом колебании материальной точки массой  $m$  вдоль оси  $x$ , подвешенной на пружине жесткостью  $k$ . Как известно, кинетическая энергия поступательного движения определяется

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

где  $v = \frac{dx}{dt} = \frac{d}{dt}(x = A \sin(\omega_0 t + \varphi_0)) = A \omega_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$ , и тогда

$$E_k = \frac{1}{2} m A^2 \omega_0^2 \cos^2(\omega_0 t + \varphi_0). \quad (8)$$

Это выражение можно переписать в виде

$$E_k = \frac{1}{2} m A^2 \omega_0^2 \left( \frac{1 + \cos 2(\omega_0 t + \varphi_0)}{2} \right). \quad (9)$$

Из выражения (9) видно, что период колебаний кинетической энергии колеблющейся точки вдвое меньше периода колебаний самой точки.

Потенциальная энергия при отклонении тела из положения равновесия на  $x$  равна

$$E_p = \frac{1}{2} m A^2 \omega_0^2 \sin^2(\omega_0 t + \varphi_0). \quad (10)$$

Полная энергия, равна сумме  $E_k$  и  $E_p$ , определяется по формуле

$$E = \frac{1}{2} m A^2 \omega_0^2. \quad (11)$$

## 1.5. Сложение колебаний

Тело 1, подвешенное на пружине жесткостью  $k$ , колеблется относительно точки  $O$ , и его смещение равно

$$y_1 = A_1 \sin(\omega t + \varphi_1).$$

Тело 2 колеблется на пружине жесткостью  $k$  относительно тела 1, и смещение тела 2 относительно тела 1 равно

$$y_2 = A_2 \sin(\omega t + \varphi_2).$$

Если массы тел и жесткости пружин одинаковы, то одинаковы будут частоты колебаний. При одинаково направленных колебаниях суммарное смещение колеблющегося тела 2 имеет вид:

$$y = y_1 + y_2 = A \sin(\omega t + \varphi),$$

где  $A$  и  $\varphi$  – амплитуда и начальная фаза результирующего колебания тела 2. Результирующая амплитуда определяется по формуле

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1), \quad (12)$$

а результирующая начальная фаза из условия

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{A_1 \sin \varphi_1 + A_2 \sin \varphi_2}{A_1 \cos \varphi_1 + A_2 \cos \varphi_2}. \quad (13)$$

Если частоты колебаний  $y_1$  и  $y_2$  неодинаковы, то результирующие вектор  $A$  и фаза все время будут меняться по величине, будет наблюдаться сложный хаотически изменяющийся колебательный процесс. Однако если два складываемых гармонических колебания одного направления мало отличаются по частоте  $\Delta\varphi$  и имеют одинаковые амплитуды, то результирующее колебание в этом случае будет происходить с периодически изменяющейся амплитудой. Такое колебание называется **биением**.

Уравнение биений определяется по формуле

$$y = \left( 2A \cos \frac{\Delta\omega}{2} \cdot t \right) \sin \omega t.$$

Поэтому результирующее колебание  $y$  можно рассматривать как гармоническое с частотой  $\omega$  ( $\omega \gg \Delta\omega$ ), амплитуда  $A_+$  которого изменяется по периодическому закону

$$A_+ = 2A \cos \frac{\Delta\omega}{2} \cdot t, \quad (14)$$

$$\text{Период биений } T_6 = \frac{2\pi}{\Delta\omega}.$$

Метод биений используется для определения частоты тона, для сравнения измеряемой величины с эталонной, для настройки музыкальных инструментов, анализа слуха и т.д.

Сложение двух гармонических колебаний одинаковой частоты  $\omega$ , происходящих во взаимно перпендикулярных направлениях вдоль осей  $x$  и  $y$ , описывается уравнением *эллипса*:

$$\frac{y^2}{A_2^2} + \frac{x^2}{A_1^2} - 2 \frac{xy}{A_1 A_2} \cos \Delta\varphi = \sin^2 \Delta\varphi, \quad (15)$$

где  $A_1$  и  $A_2$  – амплитуды колебаний вдоль осей  $x$  и  $y$  соответственно,  $\Delta\varphi$  – разность фаз обоих колебаний.

Если разность фаз  $\Delta\varphi_2 = 0$ , то уравнение (15) примет вид

$$\left( \frac{y}{A_2} - \frac{x}{A_1} \right) = 0,$$

откуда получим уравнение прямой

$$y = \frac{A_2}{A_1} x. \quad (16)$$

При  $\Delta\varphi = \pm\pi$  получим

$$y = -\frac{A_2}{A_1} x. \quad (17)$$

При  $\Delta\varphi = \pm\frac{\pi}{2}$  уравнение (15) переходит в

$$\frac{y^2}{A_2^2} + \frac{x^2}{A_1^2} = 1, \quad (18)$$

т.е. в уравнение эллипса, причем полуоси равны соответствующим амплитудам.

В реальных колебательных системах вследствие потерь энергии амплитуда с течением времени уменьшается и колебания затухают. Чтобы в реальной системе получить незатухающие колебания, необходимо компенсировать потери энергии. Такая компенсация возможна с помощью внешней возбуждающей силы, которая меняется по гармоническому закону

$$F = F_0 \cos \omega t.$$

При малых затуханиях, когда круговые частоты собственных колебаний  $\omega_0$  и вынуждающей гармонической силы  $\omega$  совпадают, амплитуда колебаний стремится к бесконечно большому значению. Это явление получило название *резонанс*.



## II. Волновые процессы

Если колеблющееся тело (камертон, струна, мембрана и т.д.) находится в упругой среде (твердой, жидкой или газообразной), то оно приводит в колебательное движение соприкасающиеся с ним частицы среды. В среде частицы связаны между собой силами взаимодействия, поэтому колебание частицы будет вызывать вынужденные колебания и у соседних с ней частиц. Далее эти, уже колеблющиеся частицы, в свою очередь, будут вызывать вынужденные колебания у своих соседних частиц, а те у своих и т.д.

Таким образом, колебания, вызванные в каком-либо месте упругой среды, будут распространяться в среде с конечной скоростью, зависящей от ее физических свойств. При этом частицы среды совершают колебательные движения около положения равновесия, а от одних участков среды к другим передаются только деформации.

Процесс распространения колебаний в среде, периодический во времени и пространстве, называется **волновым процессом** или просто **волной**. В зависимости от характера возникающих при этом упругих деформаций различают волны продольные и поперечные. В **продольных волнах** частицы среды колеблются в направлении распространения волны, в **поперечных** – в плоскостях, перпендикулярных направлению распространения волны.

Продольные волны могут распространяться в средах, в которых возникают упругие силы при деформациях сжатия и растяжения, то есть в твердых, жидких и газообразных средах. Продольные волны перемещаются в средах в виде чередующихся сгущений и разрежений среды. Поперечные волны могут распространяться в среде, в которой возникают упругие силы при деформации сдвига, то есть только в твердых телах. Таким образом, в жидкостях и газах возникают только продольные волны, а в твердых телах – как продольные, так и поперечные волны.

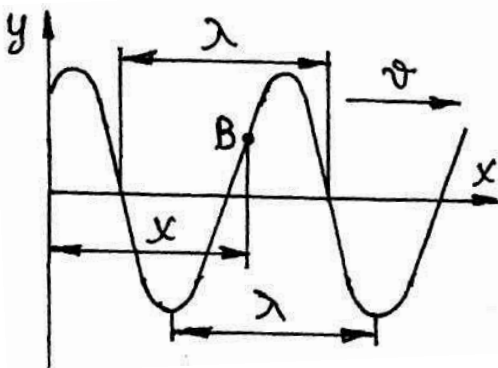


Рис.3

Упругая волна является синусоидальной (или гармонической), если соответствующие ей колебания частиц будут гармоническими (рис.3). Хотя график волнового процесса  $y=f(x,t)$  похож на график гармонического колебания, но они различны по существу. График волны определяет смещение  $y$  всех частиц среды от расстояния до источника колебаний в данный момент времени, а график колебаний – зависимость смещения данной точки от времени.

Расстояние между ближайшими точками, колеблющимися в одинаковых фазах, называется **длиной волны**  $\lambda$  (рис.3). Время одного полного колебания называется **периодом** колебаний  $T$ . За это время волновой процесс распростра-

няется на расстояние  $\lambda$ , поэтому скорость распространения колебаний от одной точки к другой равна

$$v = \frac{\lambda}{T} = \lambda\nu, \quad (19)$$

где  $\nu = \frac{1}{T}$  – частота колебаний. Уравнение колебаний частиц, лежащих в плоскости  $x$  в точке  $B$ , в момент времени  $t$  имеет вид

$$y(x, t) = A \sin \omega \left( t - \frac{x}{v} \right), \quad (20)$$

откуда следует, что уравнение (20) – это уравнение волны, являющееся периодическим процессом во времени и пространстве. Данное уравнение называется **уравнением бегущей волны** и определяет смещение любой точки среды, находящейся на расстоянии  $x$  от источника колебаний, в данный момент времени  $t$ .

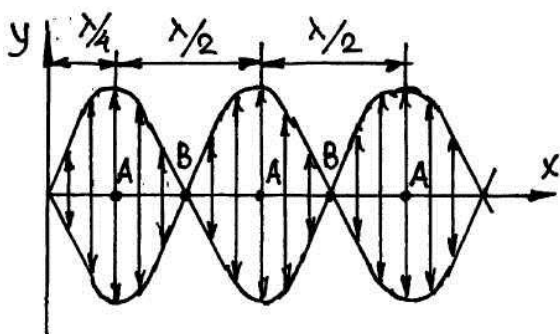


Рис. 4

Когда две одинаковые волны с равными амплитудами и периодами распространяются навстречу друг другу, то при наложении этих волн возникают **стоячие волны**. Графически стоячая волна может быть изображена так, как показано на рис.4. Точки, в которых амплитуда стоячей волны максимальна, называют **пучностями стоячей волны** (точки А на рис.4), а точки, в которых амплитуда стоячей волны

равна нулю, называются **узлами стоячей волны** (точки В на рис.4).

Характерные особенности стоячей волны в отличие от обычной «распространяющейся» (бегущей) волны следующие:

1) в стоячей волне амплитуды колебаний неодинаковы в разных точках пространства, имеются точки, где амплитуда равна нулю (узел), и точки, где амплитуда максимальна (пучность). В «бегущей» волне амплитуды везде одинаковы.

2) в пределах участка от одного узла до соседнего все точки среды колеблются в одинаковой фазе (синфазно), при переходе к соседнему участку фазы колебаний меняются на обратные, т.е. фаза скачком меняется на  $\pi$ . В «бегущей» волне фазы колебаний зависят от координат точек.

3) в стоячей волне нет одностороннего переноса энергии, как это имеет место в «бегущей» волне.

Энергия, переносимая бегущей волной в единицу времени через единичную площадь (интенсивность), зависит от круговой частоты  $\omega_0$  и амплитуды колебаний  $A$ , а также от скорости распространения волны  $v$ :

$$J = \frac{E}{St} = \frac{1}{2} \rho \omega_0^2 A^2 v, \quad (21)$$

где  $\rho$  – плотность среды.

Волны, распространяющиеся в любой упругой среде с частотами от 16 до 20000 Гц, называются **звуковыми волнами**; они воспринимаются человеческим ухом. Упругие волны с частотами, большими 20000 Гц, называются **ультразвуковыми**, а волны с частотами, меньшими 16 Гц, называются **инфразвуковыми**.

Звуковые волны в газах и жидкостях являются продольными. В твердых телах могут распространяться как продольные, так и поперечные звуковые волны. Скорость их распространения (скорость звука) в твердых телах и жидкостях зависит от упругих свойств и плотности среды и определяется по формуле

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (22)$$

где  $E$  – модуль упругости (модуль Юнга),  $\rho$  – плотность среды. В воде скорость звука равна 1480 м/с, в стали 5100 м/с.

В газах скорость звука равна

$$v = \sqrt{\gamma \frac{P_0}{\rho}}, \quad (23)$$

где  $\gamma$  – показатель адиабаты,  $P_0$  – давление,  $\rho$  – плотность газа. В воздухе скорость звука равна 340 м/с (при 20<sup>0</sup> С).

Звуковое ощущение человека характеризуется громкостью, высотой и тембром звука. Громкость определяется, в основном, амплитудой колебаний в волне. Высота звука зависит от частоты звука. С ростом частоты высота звука увеличивается. **Тембр звука** – это его оттенок или окраска. Звук является сложным периодическим колебанием волны, которое можно разложить на ряд простых синусоидальных колебаний. Получающаяся при разложении синусоида с самой низкой частотой соответствует в акустике основному тону, остальные синусоиды с высокими частотами, кратными основному тону, являются обертонами. Набор разных частот колебаний обертонов, присутствующих в данном звуке, вместе с основным тоном определяют **акустический спектр**. Тембр звука зависит от того, какие обертоны и с какой интенсивностью входят в состав сложного звука. Так, певцы, берущие одну и ту же ноту, имеют различный акустический спектр, то есть имеют различный тембр звука.

**Электромагнитные волны** являются возмущениями электромагнитного поля (то есть переменное электромагнитное поле) и распространяются в пространстве с конечной скоростью. В вакууме и воздухе скорость распространения электромагнитных волн равна 300000 км/с. Электромагнитные волны, кроме нескольких специальных случаев, – волны поперечные. В каждой точке электромагнитного поля вектор напряженности электрического  $\vec{E}$  и магнитного  $\vec{H}$  полей колеблются в плоскости, перпендикулярной к направлению распространения волны. При этом в каждой точке векторы  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  колеблются в одной фазе и всегда взаимно перпендикулярны.

Источником электромагнитных волн может быть любой электрический колебательный контур, проводник или катушка, по которым течет переменный электрический ток, поскольку для возбуждения электромагнитной волны необходимо создать в пространстве переменное электрическое поле или, соответственно, переменное магнитное поле. В зависимости от частоты (или длины волны в вакууме), а также от источников излучения и способов возбуждения различают следующие виды электромагнитных волн: радиоволны, оптическое излучение, рентгеновское излучение и гамма-излучение.

### III. Вопросы и задачи

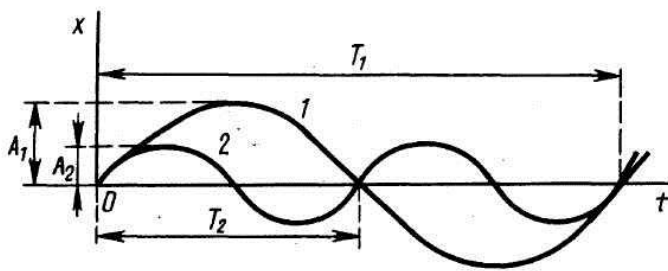


Рис. 5

1. **Энергия колебаний.** Две материальные точки одинаковой массой совершают гармонические колебания, графики которых представлены на рис.5. Какое колебание обладает большей энергией?

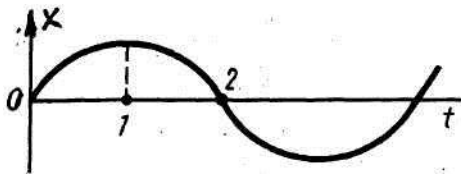


Рис.6

2. **Какой вид энергии колебаний?** Колебания материальной точки совершаются по гармоническому закону (рис.6). В какой из моментов – 1 или 2 – больше кинетическая энергия точки и в какой – больше потенциальная? В какой момент ускорение точки имеет максимальное значение (по модулю)?

3. **Катер на морских волнах.** Катер, плывущий по морю, начинает сильно раскачиваться, хотя волны сравнительно невысокие. Капитан изменяет курс катера и его скорость. Удары волн о катер становятся чаще, но тем не менее размах колебаний катера значительно уменьшается. Объясните эту ситуацию.

4. **Басовые струны.** Басовые струны музыкальных инструментов обычно оплетают спиралью из проволоки. Почему производят такую оплетку?

5. **Доска на двух вращающихся подставках.** На двух вращающихся в противоположные стороны цилиндрических, горизонтально расположенных роликах лежит доска (рис.7). Расстояние между осями роликов равно  $2l$ , вес доски  $P$ . Коэффициент трения между доской и каждым из роликов равен  $\mu$ . В начальный момент доска была положена так, что ее центр тяжести был смещен на некоторое расстояние  $x$  от средней линии  $OO'$  между роликами. Как будет двигаться доска под действием сил трения, создаваемых роликами?

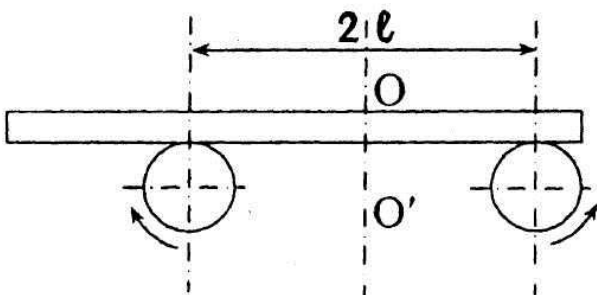


Рис. 7

6. **«Танцующая спираль».** Проводящую пружину, укрепленную за верхний конец, нижним концом погружают в чашечку с ртутью. К верхнему концу и к ртути подводят напряжение от источника постоянного тока (рис.8). При протекании тока витки пружины сближаются, она укорачивается и нижний конец выходит из ртути. Ток прекращается, пружина снова погружается в ртуть и т.д. Почему при пропускании тока пружина то сокраща-

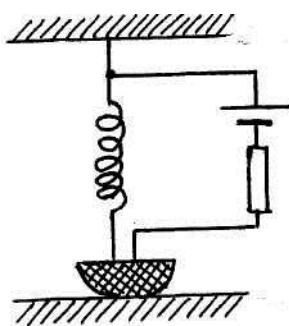


Рис.8

ется, размыкая цепь, то удлиняется, вновь замыкая ее? Какие колебания при этом совершает пружина (вынужденные или свободные)?

7. **Колебания воды в ведре.** Вода, которую несут в ведре, начинает сильно расплескиваться. Что необходимо сделать, чтобы прекратить расплескивание, не прекращая движения?

8. **Часы на высоте.** Точные астрономические часы с секундным математическим маятником установлены на первом этаже Останкинской телевизионной башни. Если эти часы перенести на верхний уровень, находящийся на высоте 540 м, то часы за одни сутки на сколько будут отставать или убежать вперед?

9. **Маятниковые часы.** Часы с маятником, длина которого не регулируется, спешат. Могут ли такие часы идти верно, если их поднять или опустить на определенную высоту относительно уровня, на котором они находятся?



Рис.9

10. **Маятник на подвижной вертикальной подставке.** По двум вертикально расположенным тросам может свободно без трения перемещаться массивная доска. К доске подвешен качающийся математический маятник (рис.9). В некоторый момент доска начинает свободно падать. Как при этом будет продолжаться двигаться маятник относительно доски, если доска начинает падать в момент, когда: 1) маятник находится в одном из крайних положений; 2) маятник находится в каком-либо промежуточном положении? Силу трения не учитывать.

11. **Сосуд с водой на длинной нити.** На длинной нити подвешен цилиндрический сосуд с водой. В дне сосуда сделано небольшое отверстие, через которое вытекает вода. Сосуд выводят из положения равновесия и отпускают. Как будет меняться период колебания такого маятника, если из отверстия постоянно вытекает вода?

12. **Качели.** Хорошо известная забава детства – качели – сиденье, подвешенное к перекладине, то есть качели – это маятник большого размера. В зависимости от конструкции сидения, на качелях могут качаться один, два и даже несколько человек. Отражится ли на период свободных колебаний качелей то, что вместо одного на них сядут двое?

13. **Маятники на одном подвесе.** На горизонтальном стержне, лежащем на двух опорах, подвешены два маятника, как показано на рис.10. Можно ли, не дотрагиваясь до маятников, привести в колебательное движение лишь один из маятников?

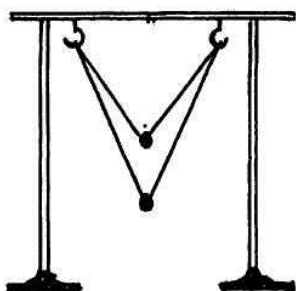


Рис. 10

14. **Магнит и металлический шарик на нити.** Железный шарик, подвешенный на длинной нити, совершает колебания. Изменится ли частота колебаний такого маятника, если снизу под ним поместить электромагнит? Как будет влиять этот электромагнит на колебания, если железный шарик поменять на медный такой же массы?

15. **Амплитуда колебаний нарастает.** Если длину математического маятника уменьшать, когда маятник проходит положение равновесия, и увеличивать в те моменты, когда его отклонение максимально, то амплитуда колебаний маятника начнет нарастать. Почему? Уменьшение и увеличение длины нити происходит на одинаковую величину.

16. **Периоды колебаний маятников.** Имеются два маятника. Период колебаний одного из них известен. Как проще всего, не пользуясь никакими приборами, определить период колебаний другого маятника?

17. **Два математических маятника, соединенные пружиной.** Два одинаковых маятника, связанных легкой пружиной (рис.11), были отклонены в плоскости чертежа в одну и ту же сторону на одинаковый угол и вследствие этого совершают колебания в плоскости. Увеличится или уменьшится период колебаний, если один из маятников удалить, а середину пружины закрепить?

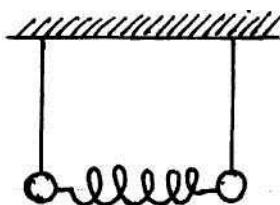


Рис.11

18. **Маятники с одинаковыми угловыми амплитудами.** Два математических маятника, имеющие одинаковые масса, но разную длину, колеблются с одинаковыми угловыми амплитудами, т.е. нить в обоих маятниках отклоняется на одинаковые углы. У какого из маятников энергия колебаний больше?

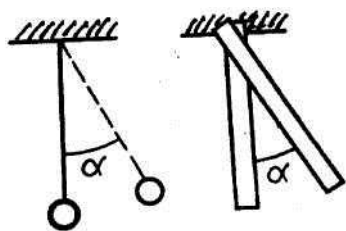


Рис. 12

19. **Колебания физического и математического маятников одинаковой длины.** Два маятника – физический в виде однородного стержня и математический, обладающие одинаковой массой и одинаковой длиной, колеблются с одинаковыми угловыми амплитудами (рис.12). У какого из маятников энергия колебаний больше?

20. **Вращение Венеры.** Астрономические наблюдения за планетой Венера показали, что Венера окружена плотной атмосферой и облаками. Из-за большой оптической плотности атмосферы и облаков поверхность Венеры недоступна оптическим наблюдениям с Земли. Основные составляющие атмосферы Венеры:  $\text{CO}_2$  (около 97%) и  $\text{N}_2$  (около 3%).

Представьте, что вы находитесь на Венере, на которой настолько густая облачность, что не видно небесных светил. Можно ли, находясь на Венере, убедиться в ее вращении вокруг своей оси и определить направление этого вращения?

21. **Лампочка на пружине.** Горящая лампочка накаливания небольших размеров приводится в колебательное движение с помощью пружинного маятника. Если лампочка колеблется с большой скоростью, то кажется, что она вспыхивает только в крайних точках своей траектории. Почему?

22. **Маятник на пружине.** Груз подвесили на пружине так, что он может участвовать в двух колебаниях: в вертикальных продольных вдоль пружины и поперечных, если пружина будет колебаться как математический маятник. При некотором подборе массы груза, упругости и длины пружины можно наблюдать следующую картину. Оттянув пружину строго вертикально, мы, как и сле-

довало ожидать, наблюдаем вертикальные колебания, но скоро они прекращаются, и груз начинает раскачиваться, подобно маятнику (рис. 13).

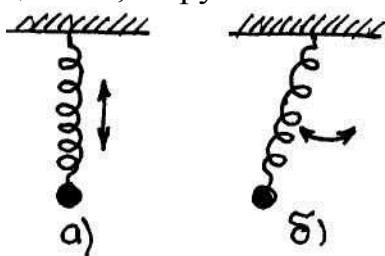


Рис. 13

Однако через некоторое время груз снова будет колебаться вертикально. Каким-то образом энергия в системе переходит от одного вида к другому. Как нужно подобрать массу груза, упругость и длину пружины, чтобы в системе осуществлялся такой периодический переход энергии? Почему он вообще происходит и с какой частотой?

23. **Пружинный маятник в невесомости.** Сохранятся ли колебания шарика, закрепленного на пружине, если вся система будет находиться в состоянии полной невесомости? Как изменится период колебаний такого маятника?

24. **Колебание ареометра.** Ареометр – прибор для измерения плотности жидкости, состоящий из шарика или цилиндра, заполненного дробью, и тонкой цилиндрической трубки (рис.14). Действие ареометра основано на законе Архимеда, который определяет действие жидкости на погруженное в нее тело. На тело, погруженное в жидкость, действует выталкивающая сила, равная весу вытесненной телом жидкости. При изменении плотности у жидкости меняется ее вес и, соответственно, будет меняться глубина погружения ареометра. Таким образом, по глубине погружения можно определить плотность жидкости. Если на ареометр подействовать сверху, то он начнет колебаться с некоторым периодом. Ареометр переносят из жидкости с меньшей плотностью в жидкость с большей плотностью. Изменится ли при этом период его вертикальных свободных колебаний?

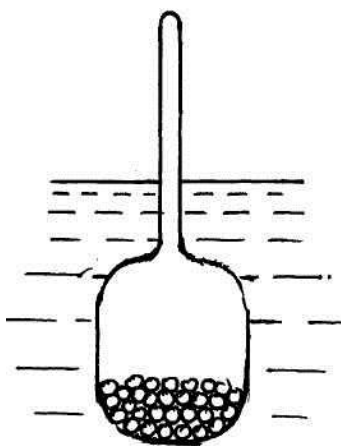


Рис. 14

25. **Колебания в жидкости пробирки с грузом.** Если на дне цилиндрической пробирки с площадью сечения  $S$  лежит груз, то при погружении пробирки в жидкость она будет находиться в вертикальном положении.

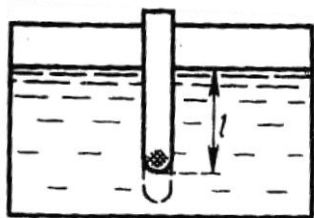


Рис.15

Пробирка, масса которой вместе с грузом равна  $m$ , в жидкости с плотностью  $\rho$  находится в равновесии, когда расстояние ее дна относительно уровня жидкости  $l$  (рис.15). После погружении пробирки относительно положения равновесия на некоторую глубину она начинает колебаться. Определить период колебаний пробирки, пренебрегая вязкостью жидкости.

26. **Период колебаний разных грузов при одинаковой амплитуде.** На двух пружинах подвешены грузы массами  $m_1$  и  $m_2$ , причем  $m_1 > m_2$ . При подвешивании грузов к свободным пружинам последние получили одинаковые удлинения (рис.16). У какого груза больше период колебаний и какой из грузов

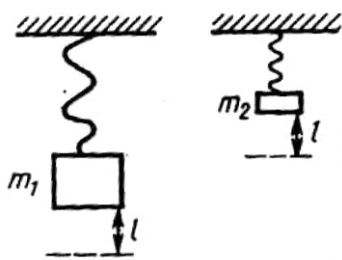


Рис. 16

при одинаковых амплитудах обладает большей энергией? Массой пружины можно пренебречь.

27. **Измерение массы в невесомости.** На космических кораблях в условиях невесомости для измерения массы тела использовалось устройство, принцип действия которого заключается в следующем. Сначала измеряют частоту колебаний тела известной массы на пружине, затем к этой массе добавляют измеряемую

массу и снова определяют частоту колебаний на той же пружине. Как, зная эти частоты, определить неизвестную массу?

28. **Грузовик на грунтовой дороге.** Грузовики въезжают по грунтовой дороге на склад с одной стороны, разгружаются и выезжают со склада с той же скоростью, но с другой стороны. С одной стороны склада выбоины на дороге идут чаще, чем с другой стороны. Как по состоянию дороги определить, с какой стороны склада въезд, а с какой выезд?

29. **Вспучивание дороги.** На дороге, которая первоначально была ровной, возникает ухаб, а вслед за ним через некоторое время еще один. Кажется, он сам собой вырастает поперек дороги. И дорога, будь то грунтованная, асфальтированная или даже бетонная – становится похожа на стиральную доску, особенно после дождя, когда в складках собирается вода. Такую картину можно наблюдать на некоторых автобусных остановках и на других участках дороги. Водители эти участки так и называют – «стиральная доска».

Подобное явление иногда наблюдается на трамвайных и железнодорожных путях. Когда по такому деформированному участку проходит поезд, возникает огромный грохот. Такие участки называются «ревущими».

Почему возникает такая волнообразная («гофрированная») поверхность и чем определяется ее период?

30. **Волны на море.** Морские волны – это удивительное явление природы. Те, кто живут на берегу моря, могут каждый день наслаждаться музыкой волн, их постоянно меняющимся видом.

Вокруг нас много различного типа волн: световые волны доносят зрительные образы, инфракрасные волны дают тепло, звуковые волны воздействуют на органы слуха. Все эти волны мы не видим, а вот волны на поверхности воды мы видим воочию и, казалось бы, хорошо знаем.

Волны, возникающие на поверхности воды, имеют разный характер в зависимости от причин, вызывающих их появление. Волны, возникающие от механических сотрясений, могут быть небольшими от брошенного в воду камня и гигантскими волнами цунами, возникающими после морских землетрясений. Волны возникают при обтекании водой тех или иных предметов. К возникновению приливных волн приводит движение Луны вокруг Земли. Но основной причиной возникновения волн на поверхности воды является, конечно, ветер. Как возникают ветровые волны и какова их основная форма, попробуйте разобраться в этом.

31. **Ох уж эти волны цунами...** Истории человечества известно много разрушительных нашествий морских волн на прибрежные территории и города,



сопровождающихся большими разрушениями и многочисленными человеческими жертвами. По своей физической природе все эти нашествия можно разделить на две группы. К одной группе следует отнести огромные волны, обрушивающиеся на побережье после того, как в море происходит землетрясение. Японцы, которым от этих волн достается чаще других, дали им название цунами, что дословно переводится как «большая волна в гавани». К этим волнам не относят ветровые морские волны (см. «Волны на море»). К другой группе относятся волны, вызванные действием сильных циклонов (см. «Циклоны»), приводящих к катастрофическим наводнениям в прибрежных районах.

Огромная разрушительная сила и страшная мощь цунами известна человечеству уже довольно давно. Тридцать пять столетий отделяет нас от того времени, когда погибла Атлантида. Археологи обнаружили и открыли древнейшую цивилизацию, которую назвали Атлантидой. Исследования показали, что четыре тысячи лет назад народ Атлантиды имел письменность, законы и деньги, построил прекрасные дворцы, города с мощеными улицами и многоэтажными домами, имел огромный морской флот, создал замечательные изделия из глины, золота, олова, меди.

В результате археологических раскопок вблизи города Латакия в Сирии были найдены глиняные таблички, поведавшие об уничтожении древнего финикийского города Угарит огромной морской волной. Это одно из наиболее древних сообщений о цунами, которое возникло в восточной части средиземного моря при взрыве вулкана Санторин в XV веке до н.э. Этот взрыв как раз и был главной причиной гибели Атлантиды. Извержение вулкана Санторин сопровождалось взрывом и мгновенным опусканием значительных участков суши в морскую пучину, произошло сильное землетрясение, возникли гигантские морские волны цунами, выпал обильный пепел. Атлантида частично провалилась в море, частично была смыта гигантскими волнами, частично засыпана толстым слоем пепла. В течение следующих столетий крупные цунами много раз обрушивались на берега, в основном Тихого океана, унося всякий раз тысячи и даже десятки тысяч человеческих жизней, производя огромные разрушения. Последние масштабные катастрофы произошли на острове Суматра в Индонезии в 2004 г. и в Тайланде в 2007 г. Каждая из этих катастроф унесла из жизни более 300 тысяч человек.

Чаще всего цунами возникают у берегов Тихого океана – на побережье Южной Америки, Новой Зеландии, Индонезии, Японии, на Алеутских островах и Камчатке (около 75% всех случаев). Реже они наблюдаются в Средиземном море (12%) и у берегов Атлантики (10%). Все эти районы являются районами повышенной сейсмичности, то есть районами, где относительно часто происходят землетрясения.

Цунами – морские (лучше сказать океанские) волны, возникающие главным образом в результате сдвига вверх или вниз протяженных участков морского дна при подводных и прибрежных землетрясениях. Ширина волн цунами составляет десятки и даже сотни километров, а так как их высота в открытом море не превышает 1-3 м, то они практически незаметны. Если такая волна, обладающая огромным запасом энергии, стремительно пронесется под кораблем,

тот лишь плавно приподнимется. Скорость распространения волн цунами 700-1000 км/ч.

В чем отличие волн цунами от сильных ветровых (штормовых) волн? У штормовых волн скорость всего 60-90 км/ч, их ширина составляет не более 100-500 м (у волн цунами в 100-1000 раз больше). В то же время высота штормовых волн в открытом море может достигать до 10-20 м, у цунами – 1-3 м. Поэтому в открытом море для судов опасны именно штормовые волны.

Совсем иное дело – волны в прибрежной полосе. Штормовые волны, имея существенно меньшую ширину и скорость по сравнению с цунами, наносят по берегу разрозненные удары, каждый из которых приходится на малый участок береговой линии. Волна же цунами стремительно подходит к берегу единым водяным валом (водяной стеной) протяженностью в десятки километров. Вот эта монолитность в сочетании с ее высотой (достигает до 30 м), огромной шириной, а также большой скоростью движения и делает ее удар столь катастрофическим для береговых строений, судов и, разумеется, людей, оказавшихся в пределах досягаемости волны.

Попробуйте объяснить, как образуется волна цунами и почему у берега волна имеет большую энергию и высоту.

**32. Распространение цунами.** При землетрясениях в глубинах океана возникают протяженные возмущения поверхности воды – волны цунами (закономерности образования волн цунами см. «Ох уж эти волны цунами...»). Особенно далеко они распространяются вдоль подводных горных хребтов, практически не теряя своей разрушительной силы. Объясните это явление.

**33. Циклоны.** Циклическая деятельность воздушных масс связана с взаимодействием теплых и холодных фронтов. Циклоны представляют собой мощные атмосферные вихри диаметром до нескольких тысяч километров и высотой 10-20 км. Вблизи поверхности земли ветры направляются от периферии к центру циклона, так как в центре циклона давление воздуха меньше, чем на его периферии. В Северном полушарии ветры «закручиваются» к центру циклона против часовой стрелки, а в Южном – по часовой. Стекающие к центру циклона воздушные массы устремляются потом вертикально вверх. Это приводит к образованию мощных слоистых и слоисто-дождевых облаков, и выпадают осадки.

По скорости ветра, мощности и разрушительному действию циклоны делятся на обычные и тропические. Скорость ветра в обычном циклоне не превышает, как правило, 50-70 км/ч. Эти циклоны обычно не причиняют серьезных неприятностей. Лишь в редких случаях они сопровождаются очень сильными ветрами. Вполне понятно, почему жители средних и северных широт Европы и России, услышав сообщение метеослужбы о том, что на Севере зародился циклон и перемещается на Европу или Россию, остаются совершенно спокойными. Это означает, что скоро испортится погода, пойдут дожди – только и всего.

Жители Японии, Кореи, Китая, Австралии, Индии, южных районов США, Центральной Америки знакомы с тропическими циклонами, намного более мощными, чем обычные циклоны. В Америке их называют хурикан, ураган или циклон, а на западном побережье Тихого океана (в Юго-Восточной и Восточ-

ной Азии) – тайфунами. Название «ураган» связано с именем бога бурь у древнего народа майя, «тайфун» в переводе с китайского означает «очень большой ветер».

Большинство тропических циклонов зарождаются в пассатной зоне, находящейся между широтами  $5^{\circ}$  и  $20^{\circ}$  в обоих полушариях, где вода над поверхностью океанов имеет повышенную температуру  $28-30^{\circ}$  С.

Ежегодно образуются до 120 тропических циклонов, однако лишь некоторые из них захватывают сушу, а среди тех, которые добираются до суши, единицы приобретают силу катастрофического стихийного явления. Отметим самые мощные тропические циклоны второй половины XX столетия.

В сентябре 1959 г. на Японию обрушился тайфун «Вера» (по странной иронии тайфунам дают женские и мужские имена). Несмотря на предупреждение и принятые меры, погибли 5 тыс. человек, 32 тыс. были ранены, остались без крова 1,5 млн. Тайфун уничтожил 400 судов большого тоннажа, были разрушены железные дороги, огромное число автомобилей было сброшено с дороги и разбито вдребезги.

В июне 1962 г. мощный тропический циклон опустошил побережье Бенгальского залива в районе Дакки. Он унес 22 тыс. человеческих жизней.

13 ноября 1970 г. мощный тайфун обрушился на побережье Пакистана. Поднятая тайфуном волна до 8 м прошла по густонаселенным островам и ударила по прибрежной полосе материка. Гигантская волна и ураганные ветры вызвали катастрофические разрушения. По официальным данным, погибло более 300 тыс. человек.

Тропические циклоны охватывают всякий раз значительные территории и могут существовать от нескольких суток до нескольких недель. Их большая способность к разрушению обусловлена тремя одновременно действующими факторами: ураганными ветрами, скорость которых может достигать 400-500 км/ч; обильными продолжительными ливнями (до 1000 мм за сутки и более); обрушением на побережье гигантских штормовых волн (см. «Волны на море»).

Что же такое – тропический циклон? Чем он отличается от обычного циклона?

**34. *Природные сонары.*** Есть в животном мире удивительные млекопитающие – летучие мыши и дельфины. Отряд летучих мышей (или рукокрылых) насчитывает около тысячи видов. Есть среди них совсем маленькие зверьки – массой всего несколько граммов (карликовые эполетовые крыланы), но есть и гиганты, такие как, летающие собаки с размахом крыльев до полутора метров. Дельфины относятся к отряду китообразных; число их видов составляет несколько десятков (белобочий дельфин, полосатый дельфин, афалина, дельфин-белобочка, касатка и др.).

Что же объединяет эти два отряда животных и почему мы их рассматриваем как бы вместе? И летучие мыши, и дельфины – млекопитающие, но в результате эволюций они приобрели способности, необычные для млекопитающих. Летучие мыши – это летающие звери, а дельфины – плавающие звери. Но есть у этих животных и более общая способность, о которой мы поговорим подробнее. Летучие мыши и дельфины – обладатели весьма совершенных при-

родных звуковых радаров, или, иначе говоря, природных сонаров (от английского слова sound – звук). В радарах для обнаружения и наблюдения за объектами используются сигналы, отраженные от этих объектов, посланные самим радаром (это–сигналы).

Летучие мыши, которые в основном относятся к ночным животным, легко ориентируются в темноте и охотятся за насекомыми. Летучая мышь легко различает неподвижные и движущиеся объекты, способна воспринимать слабое эхо от летящего комара на фоне во много раз более сильного эха от поверхности земли, деревьев и т.д. Как и летучие мыши, дельфины обладают великолепным природным сонаром, но только в воде. Известно, что дельфины могут обнаружить косяки рыб на расстояниях до километра, а на фоне любого шума могут обнаружить маленькую рыбку в пределах 50 м.

Возникает вопрос: а на каких частотах волн работают сонары у летучих мышей и дельфинов?

35. **Ультразвук животных.** Известно, что с повышением частоты звуковых колебаний они быстрее затухают с увеличением расстояния. Так почему же в действительности ультразвуковые колебания являются главным средством общения и локации у ряда животных (летучих мышей, дельфинов, морских свинок)?

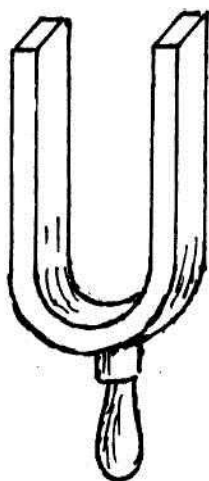


Рис. 17

36. **Камертон.** Камертон – источник звуковых колебаний в виде U-образного металлического стержня, закрепленного так, что его концы могут свободно колебаться (рис.17).

Камертон служит эталоном высоты звука при настройке музыкальных инструментов (камертон имеет частоту 440 Гц – нота «ля» первой октавы). В приборах для точного измерения времени камертон используется как источник стабильной частоты.

Зачем камертон делается с двумя ножками? Годился бы камертон для своего применения, если бы одну из ножек отпилить?

37. **Распространение звука зимой и летом.** Зимой в прохладный день звук доносится дальше, чем в теплый день. Это особенно заметно, когда звук распространяется над спокойной водной поверхностью или над покрытым льдом озером. В летний период проявляется такая же закономерность; прохладной ночью звук распространяется на большее расстояние, чем в жаркий день. Как объяснить такое свойство звука?

38. **Распространение звука при ветре.** Крик далеко находящегося от нас человека лучше слышно, если он кричит «по ветру», а не против ветра. В этом случае принято считать, что в направлении против ветра звук ослабляется сильнее. Что же происходит на самом деле?

39. **«Зона молчания».** Известен ряд случаев, когда происшедший в некотором месте А был слышен на большом расстоянии в пункте В, а в некоторой области, так называемой «зоне молчания», расположенной значительно ближе к источнику взрыва, последний не был слышен (рис.18). Среди причин, объясняющих это явление, важное место занимает отклонение звуковых волн, обусловленное наличием вертикального градиента температуры воздуха. Как с высотой должна изменяться температура, чтобы направление распространения звука было искривлено, как показано на рис.18?

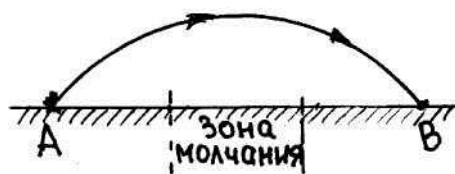


Рис. 18

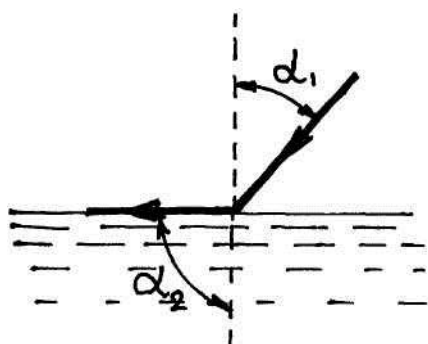


Рис. 19

было искривлено, как показано на рис.18?

40. **Звуковая волна на границе раздела воздуха и воды.** Из воздуха на поверхность раздела воздуха и воды под углом  $\alpha_1$  падает звуковая волна и распространяется, как показано на рис.19, под углом  $\alpha_2 = 90^\circ$ . Под каким углом должна распространяться звуковая волна – большим или меньшим, чем  $\alpha_1$ , чтобы проходить в воду?

41. **Разговор за спиной рыбака.** Рыбаки не любят, когда к ним подходят и начинают громко разговаривать. И они правы. Рыба в воде слышит разговоры на берегу. А мы на берегу не слышим «рыбьего разговора». Дело в том, что при переходе из воздуха в воду слышно хорошо, а наоборот – плохо. Почему?

42. **Шумящие водопроводные краны.** Иногда, когда мы открываем или закрываем водопроводный кран, трубы начинают рычать и стонать. При анализе возникающих при этом звуков появляется ряд вопросов. Почему это не происходит непрерывно? Где именно возникает звук: в водопроводном кране, в части трубы, примыкающей непосредственно к крану или в каком-либо изгибе ее где-то дальше? Почему шум начинается только при определенных уровнях расхода воды?

43. **Звуки кипящей воды.** Когда нагревается вода в кастрюле, то по звуку можно определить момент ее закипания. Вначале раздается шипение, которое постепенно нарастает, а затем наступает более резкий звук (вода как бы бурлит). Как объяснить происхождение этих звуков, особенно смягчение звука перед тем, как вода закипает?

44. **Кипение воды в чайнике.** Если прислушаться к кипению воды в чайнике, то можно заметить, что неполный чайник перед закипанием воды «шумит» сильнее, чем полный. Почему?

45. **Звук при выливании воды из бутылки.** Если выливать воду из бутылки, то по мере уменьшения количества воды в бутылке тон звуковых колебаний, возникающих при бульканьи, понижается. Если же наоборот, наливать воду в бутылку, то тон звука повышается. Почему?

46. **Звук в ванной комнате.** Если запеть в ванной комнате, то можно обратить внимание на то, что в ванной комнате голос звучит громче и более приятно, чем в большой комнате, а тем более на улице. Почему?

47. **Журчащий ручей.** Очень приятно летом лежать на траве, слушая журчание ручейка. Почему журчат ручейки? Почему режут водопады и стремнины? Чем вызвано приятное шипение открываемой бутылки лимонада?

48. **Фигурный корпус скрипки.** Многие струнные инструменты снабжены полым корпусом, которому придают различную форму. Форма корпуса балалайки не похожа на корпус гитары, а полый корпус скрипки и виолончели вообще делают фигурными. На что влияет форма полого корпуса струнного инструмента? Как от его размеров зависит тон звучания?

49. **Играя на балалайке, перебирая струны арфы...** Почему у балалайки дребезжащий, отрывистый звук, а у арфы – мягкий, певучий?

50. **Волны, возбуждаемые смычком.** При игре на скрипке звуковые волны возбуждаются смычком. Какие волны при этом возникают в струне и какие волны мы слышим?

51. **Голос разбивает бокалы.** Оперные певцы способны разбить большой винный бокал, спев очень громко определенную высокую ноту в течение нескольких секунд. Почему разбивается стекло и почему для этого должна быть спета определенная нота? Почему эта нота должна звучать несколько секунд, прежде чем бокал разобьется?

52. **Дребезжание стекол.** В окнах, под которыми проезжают автомобили, нередко назойливо дребезжат окна. Это неприятное явление можно значительно ослабить, а в некоторых случаях полностью убрать, если в центре стекла прикрепить кусочек пластилина. Как объяснить этот эффект?

53. **Разговор и шепот.** Разные люди одну и ту же фразу произносят неодинаково. В этом случае говорят, что каждый человек имеет свой тембр голоса. Чем он определяется? Почему женский голос выше мужского? Многие молодые люди переживают период «ломки» голоса. Почему это происходит? Что происходит при переходе от обычного разговора на шепот?

54. **Скрипящий мел.** Почему в некоторых случаях так ужасно скрипит мел, если мы неправильно его держим, когда пишем на доске? Как влияет при этом положение мела относительно доски и чем определяется частота издаваемого им звука?

Почему скрипят некоторые двери и визжат шины автомобиля, когда он резко трогается с места?

55. **Скрип при ходьбе по снегу.** Иногда под ногами скрипит снег, но это бывает лишь в те дни, когда температура воздуха много ниже нуля. Что создает этот звук и почему его возникновение зависит от температуры? При какой примерно температуре снег начинает скрипеть?

56. **Тишина после снегопада.** После мощного снегопада на улице становится тихо. Конечно, на улице может быть меньше машин и людей, чем обычно, но только этим нельзя объяснить тишину, вдруг спустившуюся на город. Что происходит с уличным шумом? Почему это случается, когда снег только выпал?

57. **Звук тающего льда.** Если бросить кубики льда в какой-либо напиток, то вначале будет слышно потрескивание, а затем такой звук, как будто что-то жарится на сковородке. Откуда возникают эти звуки? Правда, не всякий лед может производить «звук сковородки». Почему?

Кстати, моряки, плавающие в южных морях, говорят, что айсберги, попадая при дрейфе в южные моря, начинают подтаивать и тоже потрескивают.

58. **Распространение звука в прохладный день.** В прохладный день звук доносится дальше, чем в жаркий. Это особенно заметно, когда звук распространяется над спокойной водной поверхностью озера. Почему так происходит?

59. **Завывание ветра.** Когда ветер встречает на своем пути какие-либо препятствия, то в некоторых случаях обтекание предметов сопровождается возникновением различных звуков, которые обычно называют завыванием ветра. Оно может возникать на висящих проводах и голых ветвях деревьев или на углах крыш и других заостренных предметах. В других случаях ветер создает более приятные звуки. Почему воет ветер? Почему телеграфные провода гудят на ветру? Отчего деревья шумят зимой? Почему шумит лес? Все ли деревья шумят одинаково?

60. **Щелканье бича.** Почему возникает звук, когда щелкают бичом?

61. **Свист пули.** Почему при выстреле из винтовки или автомата пуля летит со свистом, а брошенная рукой летит бесшумно?

62. **Ухом к земле.** В старых американских фильмах-вестернах про индейцев часто можно видеть сцену, когда индейцы встают на колени и припадают ухом к земле, чтобы обнаружить далеких невидимых глазом всадников. В наших старых фильмах про партизанскую войну в тылу врага можно увидеть почти такую же картину, когда партизаны припадают ухом к рельсам железной дороги для того, чтобы услышать звук далеко расположенного приближающегося поезда издали. Если можно услышать далекий топот копыт через землю, а стук колес поезда по рельсам, то почему эти звуки не слышны в воздухе?

63. **Сверхзвуковой самолет.** Когда самолет летит со скоростью меньше скорости звука, на земле слышен шум его двигателей. Если же самолет увеличивает скорость до сверхзвуковой, то сначала слышен громкий хлопок, а затем уже шум двигателей. С чем это связано?

64. **Рев гоночных машин и артиллерийских снарядов.** У гоночных машин для исключения потерь мощности убирают глушитель, поэтому при движении с большой скоростью гоночные машины издадут звуки в виде рева. Почему нам кажется, что частота рева автомобиля меняется, когда машина проносится мимо нас?

На полях сражений солдаты предугадывают опасность летящего снаряда по издаваемому им звуку. Они прислушиваются не только к громкости, но и к частоте звука, а также к ее изменению. О чем в этом случае говорит им частота звука?

Меняется частота сигнала, когда встречный поезд проносится мимо вашего поезда. Пока оба поезда сближаются, частота сигнала заметно выше той, которая слышится, когда поезда удаляются друг от друга. Отчего это происходит?

Во всех этих случаях наблюдается одно и то же явление.

65. **Звукоизоляция стекла.** Звукопроницаемость стекла значительно меньше звукопроницаемости воздуха, однако, закрывая окно, мы сильно ослабляем слышимость уличного шума (а наличие двойных рам, а тем более тройное остекление почти полностью прекращает его доступ в комнату). Как можно объяснить такое явление?

66. **Когда стук громче?** Почему стук громче, если стучать не в стенку, а в дверь. Как по звуку определить, какая дверь тоньше?

67. **Гром и его раскаты.** Огромная черная грозовая туча закрывает половину неба. Сверху из тучи к Земле устремляются мощные потоки холодного воздуха, порождая вихри пыли. И практически сразу же начинается сильный дождь, а иногда и град. Сверкают молнии, гремит гром. Откуда появляется гром, и почему мы слышим гром в течение нескольких секунд, тогда как разряд молнии длится всего доли секунды?

68. **Действие инфразвука.** Инфразвук (звук с частотой ниже 16 Гц) может вызывать у человека тошноту и головокружение, а в некоторых случаях даже привести к летальному исходу. Особенно опасна частота инфразвука в 7 Гц. Когда опасность инфразвука для человека была установлена, его стали усиленно изучать и обнаружили повсюду: вблизи аэродромов, в автомобилях при движении с очень большой скоростью, на побережье морей, во время гроз и смерчей. Уже установлено, что животным и некоторым особо восприимчивым людям инфразвуковые сигналы несут предупреждение о приближающемся землетрясении. Почему инфразвук оказывает такое воздействие на людей и животных? Как объяснить способность инфразвука в некоторых случаях приводить к возникновению у человека внутреннего кровоизлияния?

69. **Жужжание насекомых.** Многие насекомые во время полета издают жужжащие звуки. При определенной наблюдательности и соответствующей тренировке по жужжанию можно сказать, какое насекомое издает тот или иной звук. Например, мы все хорошо знаем жужжание комара, которое мы называем писком, или жужжание пчелы. По жужжанию мы можем даже судить о размере насекомого. Крупные насекомые издают звук более низкого тона, мелкие - более высокого тона.

Как насекомые издают жужжащие звуки (ведь у большинства из них нет для этого никаких особых органов и издают они звук только во время полета)?

70. **Звук и радиоволны.** Концерт пианиста транслируется по радио и телевидению. В концертном зале, где играет пианист, зритель находится на расстоянии около 30 м от рояля. В это же время концерт видит и слушает телезритель в своей квартире, которая находится примерно в 300 км от концертного зала. Кто раньше услышит первый аккорд пианиста: зритель в зале или телезритель?

71. **Автомобильная антенна.** Почему антенны автомобильных радиоприемников устанавливаются снаружи и, как правило, вертикально?

72. **Зоны молчания на коротких волнах.** При приеме радиосигнала на коротких волнах можно обратить внимание на неустойчивый прием. Принятый сигнал как бы то удаляется, то приближается, а в некоторые моменты может



вообще исчезнуть. Почему при связи на коротких волнах образуются так называемые зоны молчания?

73. **Дальность приема радиосигнала ночью.** Почему станции длинно- и средневолнового диапазонов ночью можно принимать на гораздо большем расстоянии, чем это удастся днем?

74. **Радиосвязь с подводной лодкой.** Когда подводная лодка находится под водой, радиосвязь с ней осуществить невозможно на любых частотах. Почему так происходит?

75. **Дальность приема телевизионных сигналов.** Известно, что станции, работающие в УКВ-диапазоне, и телевизионные передачи редко удается принимать слишком далеко от места, где находится передающая станция или ретранслятор (приемо-передающая станция). Почему устойчивый прием телевизионных сигналов возможен только в пределах прямой видимости?

76. **Марширующие под музыку.** Если внимательно наблюдать издали за марширующей под музыку группой военнослужащих, то кажется, что они идут не в такт с музыкой. Почему так происходит?

77. **Лампа накаливания при переменном токе.** Направление переменного тока и величина напряжения все время меняется от максимального значения до нуля и обратно. Почему же лампа накаливания светит не мигая?

78. **Каков же цвет светофора?** Знаменитый американский физик-оптик Роберт Вуд был большим шутником и любителем быстрой езды на автомобиле. Друзья рассказывали о том, как оправдывался Вуд, когда он, не сумев затормозить, выехал на перекресток при красном свете светофора. После того, как его задержал полицейский, стал оправдываться и доказывать, что не виноват, а виноват эффект Доплера (см. «Рев гоночных автомобилей и артиллерийских снарядов»), при котором, как пояснил Вуд, повышается тон сигнала от движущегося навстречу автомобиля. Это происходит потому, что в ухо попадает на единицу времени больше звуковых волн. Аналогичное явление наблюдается и для света. Если источник света приближается к вам, то свет вам кажется другого оттенка, он будет смещаться к синему концу спектра. Поэтому, так как Вуд ехал быстро, он сказал, что ему красный огонь светофора показался зеленым.

Неизвестно, чем закончился разговор Вуда с полицейским, но друзья утверждают, что Вуда все же оштрафовали за быструю езду. Возникает вопрос – а имел ли Вуд право ссылаться на эффект Доплера?

79. **Изменяющаяся длина маятника.** Перекиньте через крючок в потолке шнур, привяжите к одному его концу небольшой груз, и, слегка раскачав, понемногу «выбирайте» другой конец шнура. Как при этом будет изменяться период колебаний?

#### IV. Подсказки

1. Энергия колебаний определяется по формуле (11)  $E = \frac{1}{2}mA^2\omega_0^2$ , где  $m$  – масса колеблющегося тела,  $\omega_0$  – круговая частота,  $A$  – амплитуда колебаний.
2. Кинетическая энергия зависит от скорости движения тела, а потенциальная – от смещения из положения равновесия.
3. Возникает резонанс колебаний катера.
4. Увеличивается масса струны.
5. Сила трения на роликах зависит от силы нормального давления.
6. Витки пружины при пропускании тока являются параллельными проводниками.
7. Необходимо изменить темп ходьбы.
- 8, 9. Необходимо в формуле для периода колебания учесть изменение ускорения на разных высотах.
10. Все тела системы при свободном падении летят с одинаковым ускорением.
11. При вытекании воды из цилиндрического сосуда меняется положение центра тяжести системы.
12. Период колебаний математического маятника зависит от длины подвеса и ускорения.
13. Необходимо создать резонансные колебания.
14. Электромагнит снизу действует с силой, направленной вертикально вниз.
15. При изменении длины нити математического маятника на одну и ту же величину в положении равновесия и в положении максимального отклонения совершается различная работа.
16. Необходимо сравнить число колебаний обоих маятников.
17. При синхронном колебании пружина не влияет на период колебаний. Когда пружина закреплена, она влияет на период колебаний.
- 18, 19. Энергия колебаний определяется высотой поднятия тела при отклонении от положения равновесия или скоростью движения тела.
20. Необходимо применить маятник Фуко.
21. Необходимо связать время свечения лампочки со временем нахождения ее в данной точке.
22. Происходит резонансный переход энергии.
23. Колебания пружинного маятника определяются жесткостью пружины и массой колеблющегося тела.
24. Колебания ареометра определяются силой Архимеда.
25. Сила Архимеда при погружении в жидкость пробирки с грузом выполняет роль упругой силы.
26. Период колебаний груза на пружине  $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$ , жесткость пружины  $k$  определяется силой, приложенной к пружине для ее удлинения на единицу длины.

27. Циклическая частота зависит от массы колеблющегося на пружине тела.
28. Частота колебаний зависит от массы груза и грузовика.
29. Вспучивание дороги обусловлено колебаниями автомобиля.
30. Ветровые волны возникают при изменении давления вблизи поверхности воды при возникновении вихрей.
31. В волне цунами в колебательном процессе находится объем воды от самого дна до поверхности моря, а в штормовых волнах только верхние слои.
32. Волновые процессы на поверхности моря при землетрясениях зависят от глубины.
33. Циклоны возникают при взаимодействии теплых и холодных потоков воздуха с понижением давления в центре.
34. Длина волны сонаров должна быть соизмерима с размерами препятствия.
35. Ультразвуковые колебания имеют большую частоту и малую длину волны.
36. Необходимо обратить внимание на положение центра тяжести при колебаниях.
37. Скорость звука в воздухе меняется при изменении температуры.
38. Скорость звука зависит от скорости ветра на разных высотах; обычно скорость ветра возрастает с увеличением высоты.
- 39, 40. При переходе звуковой волны через границу раздела сред выполняется закон преломления волн. Скорость звука в газах зависит от температуры.
41. Человек и рыбы реагируют на колебания давления.
42. Звуковой шум возникает при вихревом течении жидкости.
43. Все звуки в нагреваемой воде связаны с образованием и разрывом газовых пузырьков.
44. Полость является резонатором звука.
45. Частота, определяющая тон звука, зависит от объема столба воздуха.
46. В небольшой комнате звук многократно отражается.
47. Образование пузырьков воздуха или газа в жидкости (воде) связано со звуковыми колебаниями.
48. На основной тон накладываются обертоны, возникновение которых зависит от формы и размеров корпуса струнного инструмента.
49. Характер звучания струнного инструмента зависит от количества высокочастотных обертонов.
50. В твердом теле могут возникать продольные и поперечные волны, в воздухе возникают только упругие продольные волны.
- 51, 52. Наступает резонанс колебаний.
53. Звуки, которые произносит человек, зависят от свойств голосовых связок и носоглотки.
54. Возникает зацепление и соскальзывание.
55. Трескается ледяная корка снега.
56. Происходит образование пустот между снежинками.

57. При нагревании возникают температурные напряжения.
58. Скорость звука в воздухе меняется с высотой в жаркий и прохладный день по-разному.
59. Завывание ветров обусловлено образованием вихрей.
60. Возникает или резкий удар, или ударная волна.
61. Скорость полета пули больше скорости звука.
62. Скорость звука в более плотной среде больше и меньше поглощается.
63. Возникает ударная волна.
64. Наблюдается эффект Доплера.
65. На границе раздела воздух-стекло и стекло-воздух происходит отражение звуковых волн.
66. Громкость звука определяется амплитудой колебаний.
67. Гром появляется при резком расширении воздуха, а раскаты связаны с возникновением эха.
68. Малая частота инфразвука с большой амплитудой может привести в колебательное движение некоторые органы живых организмов.
69. Насекомые взмахами крылышек создают звуковые колебания.
70. Скорость звука в воздухе около 340 м/с, а скорость радиоволн – 300 тыс. км/с.
71. Антенны автомобильных радиостанций расположены вертикально.
72. Короткие волны отражаются от земли и ионосферы.
73. Отражающие свойства ионосферы зависят от степени ионизации молекул.
74. Происходит поглощение радиоволн.
75. Для УКВ-сигналов ионосфера прозрачна.
76. Скорость света во много раз больше скорости звука.
77. Лампа накаливания обладает свойством тепловой инерции.
78. Попробуйте оценить, с какой скоростью должен двигаться автомобиль, чтобы красный цвет стал зеленым.
79. Период колебаний математического маятника зависит от длины нити.

## V. Ответы и решения

1. Из графика колебаний (рис.5) видно, что у колебания первого тела период вдвое больше и, следовательно, вдвое меньше частота колебаний, чем у колебания второго тела. Амплитуда  $A_1$  вдвое больше амплитуды  $A_2$ . Энергия гармонических колебаний определяется по формуле  $W = \frac{1}{2}m\omega^2A^2$ , тогда энергия колебаний первого тела равна  $W_1 = \frac{1}{2}m\omega_1^2A_1^2$ , а энергия колебаний второго тела  $W_2 = \frac{1}{2}m\omega_2^2A_2^2 = \frac{1}{2}m\left(\frac{\omega_1}{2}\right)^2(2A_1)^2 = W_1$ . Таким образом, энергии обоих тел одинаковы.

2. Кинетическая энергия максимальна в тот момент, когда скорость максимальна по модулю. Скорость же, определяемая производной смещения по времени, имеет максимальное значение в момент 2 (рис.6).

Максимальная потенциальная энергия определяется максимальным смещением, т.е. амплитудой, и равна  $k\frac{A^2}{2}$ . Следовательно, она максимальна в момент 1. В этот момент равна нулю кинетическая энергия, а в момент 2 - потенциальная энергия.

Ускорение точки максимально в тот момент, когда максимально значение второй производной смещения. Этот момент соответствует точке 1. Так как в этот момент вторая производная отрицательна, то отрицательно и ускорение.

3. Если катер плывет по морю и его скорость совпадает со скоростью распространения волны, то даже при невысокой волне катер начинает сильно раскачиваться. Этот процесс получил название – резонансная раскачка. Для того, чтобы убрать резонансную раскачку, необходимо изменить курс катера или изменить скорость плавания, а лучше сделать и то, и другое.

4. Частота колебаний зависит от жесткости материала, из которого изготовлена струна, и от массы струны. При увеличении толщины и массы струны становится меньше частота упругих волн и ниже тон издаваемого звука.

5. Со стороны каждого из роликов на доску действуют силы трения  $F_1 = \mu N_1$  и  $F_2 = \mu N_2$ , где  $N_1$  и  $N_2$  – давление доски на соответствующие ролики. Силы трения  $F_1$  и  $F_2$  направлены к оси симметрии роликов (рис.20).

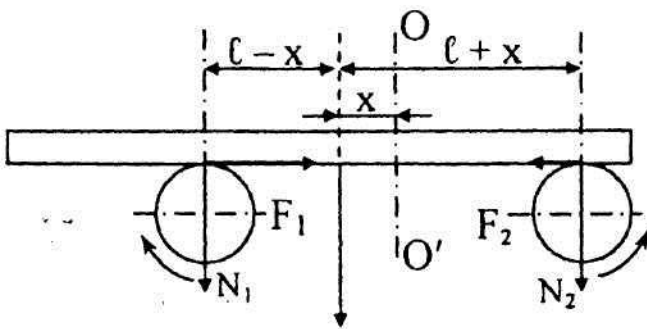


Рис.20

Если в начальный момент центр тяжести доски сместить от средней линии  $OO'$  на некоторое расстояние  $x$  (на рисунке доска смещена влево), то силы давления  $N_1$  и  $N_2$ , а, следовательно, и силы  $F_1$  и  $F_2$  не будут равны друг другу. В случае, изображенном на рис.20, давление  $N_1$  больше  $N_2$ , так как с левой стороны больше свисание. Сила  $F_1$  также больше  $F_2$ , и доска под действием силы  $F_1$  начнет смещаться в сторону оси симметрии (вправо), которую проходит с некоторой скоростью и смещается от-

носителем оси симметрии в противоположную сторону. При смещении в противоположную сторону становится больше сила  $F_2$ , и доска начнет смещаться назад к оси симметрии.

Таким образом, доска будет стремиться возвратиться в положение равновесия, и за счет действия сил трения возникнут колебательные движения доски.

6. Витки пружины представляют собой параллельные проводники, по которым течет ток в одном направлении. При прохождении тока витки притягиваются друг к другу в результате магнитного взаимодействия, пружина сжимается и нижний конец выходит из ртути. Электрическая цепь разрывается, магнитное поле исчезает, пружина распрямляется, нижним концом замыкает цепь и все повторяется.

В системе отсутствует вынуждающая периодическая сила; следовательно, колебания не вынужденные. Частота колебаний определяется массой и упругими свойствами пружины, а так как амплитуда остается постоянной, то колебания являются незатухающими, хотя, разумеется, при движении потери энергии неизбежны. Эти потери компенсируются за счет энергии источника тока. Таким образом, колебания относятся к типу колебаний, которые совершаются с собственной частотой с восполнением потери энергии за счет внешнего непериодического источника, т.е. являются автоколебаниями.

7. При ходьбе тело человека совершает колебания, поэтому вода в ведре, которую несет человек, тоже совершает колебания, и если эти колебания происходят с частотой, соответствующей темпу ходьбы, то возникают резонансные колебания воды и вода начинает расплескиваться. Для того, чтобы прекратить расплескивания, необходимо изменить темп ходьбы, то есть изменить тем самым частоту внешней силы, вызвавшей резонансные колебания воды.

8. При правильном ходе маятник часов в течение суток должен сделать  $N = \frac{24 \cdot 60 \cdot 60}{T}$  колебаний в сутки. Период колебаний маятника до переноса часов равен  $T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g_0}}$ , где  $g_0$  – ускорение силы тяжести на высоте первого этажа,  $l$  – длина маятника.

Период колебаний маятника после переноса на высоту  $T_2 = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$ , где  $g$  – ускорение силы тяжести на высоте верхнего этажа. Из закона всемирного тяготения  $g = g_0 \left(\frac{R}{R+h}\right)^2$ , где  $R$  – радиус Земли,  $h$  – высота башни (540 м). Тогда  $T_2 = T_1 \frac{R+h}{R} = T_1 \left(1 + \frac{h}{R}\right)$ , то есть  $T_2$  больше, чем  $T_1$ . Таким образом, одно полное колебание на часах будет соответствовать 1 с, а фактическое время  $T_2$  будет больше, и часы начнут отставать. За сутки это отставание будет равно  $\Delta t = N(T_2 - T_1)$ ,  $T_2 - T_1 = T_1 \frac{R+h}{R} - T_1 = \frac{h}{R} T_1$ .

Отставание часов за сутки будет равно  $\Delta t = \frac{Nh}{R} T_1 = \frac{24 \cdot 60 \cdot 60 \cdot 540}{6,4 \cdot 10^6} \cdot 1 = 7,3$  с.

9. Если маятниковые часы спешат, а длина маятника не регулируется, то необходимо, чтобы такие часы шли верно, поднять или опустить на определенную высоту относительно уровня, на котором они находятся.

10. Если доска с маятником начинает свободно падать, то сила тяжести, действующая на маятник, сообщает маятнику ускорение свободного падения и уже не является силой, возвращающей маятник к положению равновесия, как при неподвижной доске. Так как доска массивна, то движение маятника не влияет на движение доски и она имеет ускорение свободного падения. Поскольку других внешних сил нет, маятник будет сохранять относительно доски то движение, которым он обладал в момент начала падения. Следовательно, если маятник в момент начала падения находился в своем крайнем положении, то он относительно доски останется неподвижным, так как его скорость в этом положении была равна нулю.

Если маятник в момент начала падения находился в промежуточном положении, то есть обладал какой-то скоростью, то маятник начнет вращаться вокруг точки подвеса равномерно со скоростью, которой он обладал в момент начала падения.

11. Сосуд с водой на длинной нити – это своеобразный математический маятник, период которого определяется по формуле  $T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$ . Если из сосуда через отверстие в дне постепенно вытекает вода, то по мере вытекания воды из сосуда центр тяжести жидкости, а значит, и центр тяжести маятника будет опускаться и расстояние от центра тяжести до точки подвеса увеличится (рис.21). Поэтому вначале по мере вытекания воды будет постепенно расти период колебаний маятника.

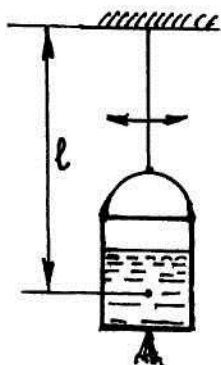


Рис. 21

Когда воды в сосуде становится мало, то при ее вытекании центр тяжести сосуда с водой может начать повышаться и период колебаний маятника уменьшаться. Это можно понять из того, что, когда вся вода вытечет из сосуда, центр тяжести сосуда будет выше, чем в том случае, когда уровень воды в сосуде лежит ниже центра тяжести самого сосуда.

Такого изменения периода колебаний происходить не будет, если центр тяжести самого сосуда находится в дне сосуда. В этом случае период колебаний будет только возрастать.

12. Период колебаний маятника, а качели – это маятник, зависит от длины веревок или стержней, на которых подвешено сиденье качели, и не зависит от массы сидящих, если не изменится положение центра тяжести. Так как длина подвеса не меняется, то и не изменится период колебаний.

13. Маятники, подвешенные на горизонтальном стержне, имеют разную длину и, соответственно, разные собственные периоды и частоты колебаний. Чтобы привести в колебательное движение только один маятник, не дотрагиваясь до него, необходимо сообщить подставке небольшие толчки с частотой, равной частоте собственных колебаний этого маятника, то есть вызвать резонанс.

14. Металлический шарик, подвешенный на длинной нити, является математическим маятником. Период колебаний такого маятника  $T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g_0}}$ , где  $g_0$  – ускорение в соответствующей системе координат. Если на маятник действует только сила тяжести, то  $g_0$  является ускорением свободного падения тела  $g$ . Если шарик маятника будет железным, то электромагнит, поднесенный снизу, будет притягивать с какой-то силой, которая будет создавать дополнительное ускорение  $a$  и  $g_0 = g + a$ . Таким образом, электромагнит будет уменьшать период колебаний маятника с железным шариком, а частота колебаний будет увеличиваться.

Если поменять железный шарик на медный, то электромагнит на медный шарик действовать не будет и период колебаний маятника меняться не будет.

15. Когда мы поднимаем маятник, мы совершаем работу и увеличиваем его потенциальную энергию. Когда маятник опускается, сила тяжести совершает работу и потенциальная энергия маятника уменьшается. Но все дело в том, что в систему поступает энергии больше, чем расходуется. Действительно, поднимая нить маятника на высоту  $h$  и тем самым укорачивая  $h$  на длину нити (рис.22), мы совершаем работу  $A_1 = F_1 h = \left(mg + \frac{mv^2}{R}\right) h$  (поскольку равнодействующая сил  $F_1$  и  $mg$  сообщает маятнику центростремительное ускорение, то  $F_1 - mg = \frac{mv^2}{R}$ ). Когда же в точке максимального отклонения от положения равновесия мы даем возможность маятнику опуститься на  $h$ , т.е. увеличиваем до первоначального значения длину нити, сила тяжести совершает работу

$A_2 = mgh \cos \alpha$ , так как перемещение маятника по вертикали равно  $h \cos \alpha$ .

Таким образом, в систему поступает энергия  $E = A_1 + A_2$ . Она больше нуля, поэтому амплитуда колебаний будет увеличиваться (конечно, если поступающая превышает работу сил сопротивления).

Нетрудно понять, исходя из предыдущих рассуждений, почему качели раскачиваются, если приседать всякий раз, когда качели максимально отклонены, и вставать при прохождении положения равновесия.

И в этом случае как бы меняется длина нити маятника (если длиной нити считать расстояние от точки подвеса до положения центра тяжести человека), а роль силы натяжения нити выполняет сила реакции со стороны ног –  $N$ . В положении равновесия  $N = mg + \frac{mv^2}{R}$  и  $A_1 = \left(mg + \frac{mv^2}{R}\right) h$ , где  $h$  – высота подъема центра тяжести человека. Когда качели максимально отклонены и человек приседает, сила тяжести совершает работу  $A_2 = mgh \cos \alpha$ . За период система получает энергию

$$E = 2(A_1 - A_2) = 2h \left[ \frac{mv^2}{R} + mg(1 - \cos \alpha) \right].$$

Эта величина положительна, поэтому энергия и, следовательно, амплитуда колебаний будут увеличиваться.

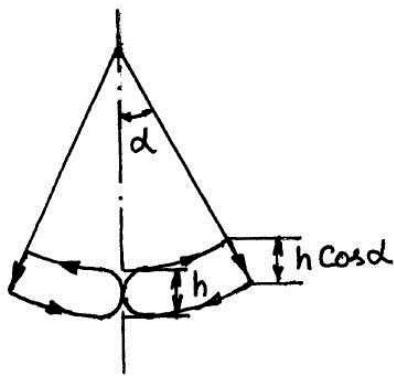


Рис. 22



Оба примера показывают, как можно увеличить энергию колебаний периодическим изменением параметров системы с частотой, вдвое большей частоты колебаний. Такое возбуждение колебаний называется параметрическим, а резонанс изменений параметров с частотой колебаний называется параметрическим резонансом.

16. Необходимо подвесить оба маятника рядом, чтобы наблюдения за ними можно было вести совместно. Выведя маятники из положения равновесия в одном направлении, одномерно отпускаем их. В начальный момент фазы колебаний будут одинаковыми, но постепенно маятник с меньшим периодом «обгонит» другой, но через некоторое время колебания снова совпадут по фазе.

Очевидно, что если к этому времени первый маятник совершит  $n$  колебаний, которые необходимо сосчитать, то второй – на единицу меньше. Так как время колебаний будет одно и то же, то  $nT_1 = (n-1)T_2$ , где  $T_1$  и  $T_2$  – периоды колебаний первого и второго маятников.

Из полученного выражения видно, что, зная период одного из маятников (дан по условию), а также  $n$  (определяется на опыте счетом), можно найти период второго:

$$T_2 = \frac{n}{n-1} T_1 \text{ или } T_1 = \frac{n-1}{n} T_2.$$

17. В случае, когда одинаковые маятники отклонены в одну сторону на одинаковые углы, каждый маятник колеблется только под действием собственного веса, так как пружина не растягивается и не сжимается (рис.23, а). Во втором случае, когда середина пружины закреплена, к составляющей силы тяжести прибавляется сила упругости пружины, направленная всегда к положению равновесия. Поэтому ускорение маятника в каждый момент во втором случае будет больше, чем в первом. Так как период колебаний тем меньше, чем больше ускорение, то во втором случае период колебаний будет меньше, чем в первом (рис.23, б).

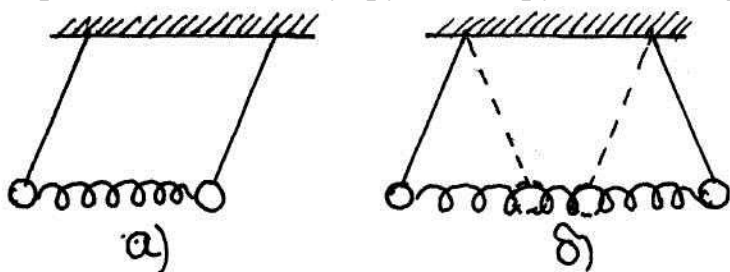


Рис. 23

чем в первом (рис.23, б).

18. Полная энергия колебаний материальной точки может быть приравнена максимальной кинетической или максимальной потенциальной энергии. В данном случае удобно сравнивать максимальные потенциальные энергии, определяемые максимальным отклонением. По сравнению с положением равновесия грузы при наибольшем отклонении подняты на высоту  $h = l(1 - \cos\alpha)$  (рис.24).

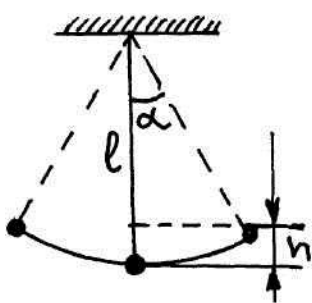


Рис. 24

энергией.

19. Так же, как в предыдущем вопросе, полную энергию можно приравнять к максимальной потенциальной. Так как центр тяжести физического ма-

ятника выше, то его можно уподобить математическому меньшей длины и, следовательно, у математического маятника энергия больше.

20. Определить направление вращения планеты вокруг своей оси можно с помощью математического маятника. Впервые с помощью маятника был продемонстрирован опыт, подтверждающий вращение Земли, в 1852 г. французским физиком Л.Фуко (1819-1868). Массивный груз на проволоке или нити длиной в несколько десятков метров, укрепленный на опоре с помощью карданного шарнира или горизонтального подшипника, дающего возможность качания маятника в любой вертикальной плоскости, получил название маятник Фуко.

Силы, действующие на груз маятника – силы притяжения и натяжения нити, - лежат в плоскости качания маятника и не могут вызвать ее вращения, т.е. относительно точки подвеса плоскость не меняется. В то же самое время здание, к которому крепится маятник, вместе с Землей вращается. Таким образом можно заметить вращение любой планеты относительно плоскости колебания маятника Фуко. Раньше, когда Исакиевский собор в Санкт-Петербурге не был действующим, в нем был маятник Фуко длиной 98 м.

21. Двигаясь с большой скоростью при колебательном движении, светящаяся лампочка оставляет только размытый светящийся след. В крайних точках лампочка имеет скорость, равную нулю. Так как в этой точке меняется направление движения, то два следа как бы накладываются друг на друга и возникает кажущаяся вспышка.

22. Массу груза, упругость и длину пружины нужно подобрать так, чтобы частота чисто упругих колебаний совпадала с частотой чисто «маятниковых». Как только в системе начнутся колебания одного из этих типов, из-за изгиба пружины возникнут и другие колебания, и энергия колебаний первого типа будет «перекачиваться» колебаниями второго типа и наоборот. Происходит своеобразная резонансная передача энергии от одного вида колебаний к другому.

Аналогичная связь между двумя типами колебаний (изгибным и крутильным) крыла самолета одно время приводила к разрушению крыла. Это явление получило название флаттер (от английского flutter – вибрация). При флаттере на определенных скоростях полета летательного аппарата возникают самовозбуждающиеся колебания его частей (главным образом крыла и оперения) с быстро возрастающей амплитудой. Предотвращение флаттера достигается рациональным распределением массы в конструктивных элементах, повышением жесткости и т.п.

23. Колебание шарика на пружине происходит за счет возникновения силы упругости при сжатии или растяжении пружины. А так как сила упругости существует и в невесомости, то колебания шарика на пружине сохраняются при любых условиях. Период колебания пружинного маятника в невесомости меняться не будет, так как он определяется только жесткостью пружины и массой колеблющегося тела.

24. При смещении цилиндрической трубки ареометра относительно положения равновесия на величину  $x$  действующая на ареометр сила окажется равной

$$F = -\rho S x g,$$

где  $\rho$  – плотность жидкости,  $S$  – сечение трубки,  $g$  – ускорение свободного падения (см. «Сила Архимеда»). Знак «минус» означает, что сила направлена против смещения  $x$ .

Согласно второму закону Ньютона, колебания ареометра определяются уравнением  $ma = -\rho S x g$ , где  $m$  – масса ареометра. Это уравнение аналогично уравнению для колебания груза на пружине  $ma = -kx$ . Так как для груза период колебаний  $T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$ , то для ареометра  $k = \rho g S$  и период колебаний будет определяться по формуле  $T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{\rho g S}}$ . Следовательно, если ареометр перенести из жидкости с меньшей плотностью в жидкость с большей плотностью, период колебаний уменьшится.

25. В данном случае роль квазиупругой силы играет архимедова сила. Когда дно пробирки находится ниже или выше положения равновесия на  $x$ , эта сила равна:

$$F = -S x \rho g. \quad (1)$$

Масса пробирки вместе с грузом равна массе вытесненной жидкости, т.е.

$$m = l S \rho. \quad (2)$$

Из (1) определим «коэффициент упругости»:

$$k = \frac{|F|}{x} = S \rho g. \quad (3)$$

Подставляя (2) и (3) в выражение для периода колебаний  $T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$ , получим  $T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$ .

Оказывается, период колебаний не зависит ни от массы, ни от площади сечения пробирки, ни от плотности жидкости, а определяется только глубиной погружения  $l$ .

26. Период гармонических колебаний, происходящих под действием квазиупругой силы ( $F=-kx$ ), определяется выражением  $T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$ . Коэффициент упругости  $k$  определяется силой, которую необходимо приложить, чтобы удлинить пружину на единичную длину. В данном случае удлинение происходит под действием веса груза и, следовательно,

$$k_1 = \frac{m_1 g}{l} \text{ и } k_2 = \frac{m_2 g}{l}.$$

Подставляя  $k$  в формулу для периода, видим, что массы сокращаются и в обоих случаях период равен  $T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$ . Т.е. период колебания обоих грузов будет одинаковым.

Энергию колебаний груза можно записать в виде  $W = \frac{1}{2} m A^2 \omega^2$ . Так как периоды, а следовательно, и частоты равны и равны согласно условию амплитуды, то большей энергией обладает груз  $m_1$ .

27. Если  $m_0$  – известная,  $m$  – измеряемая массы,  $\omega_0$  и  $\omega$  – циклические частоты колебаний систем с соответственно известной массой  $m_0$  и известной вместе с измеряемой массами, то

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m_0}}, \quad \omega = \sqrt{\frac{k}{m_0+m}},$$

где  $k$  – коэффициент упругости пружины. Из записанных уравнений получаем формулу для определения измеряемой массы  $m$ :

$$m = m_0 \left( \frac{\omega_0^2}{\omega^2} - 1 \right).$$

28. Все транспортные машины, грузовые автомобили в том числе, снабжены подвеской, которая связывает колеса с рамой (кузовом) и предназначена для уменьшения динамических нагрузок, передающихся автомобилю вследствие неровностей поверхности дороги. Основной деталью подвески является мощная пружина или рессора (набор упругих пластин), поэтому вся масса автомобиля с грузом действует на пружины подвесок. Следовательно, автомобиль представляет собой своеобразный пружинный маятник, частота колебаний которого определяется по формуле  $\nu = \frac{1}{T} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$ .

Из этой формулы следует, что при большей массе частота колебаний будет меньше, т.е. у груженого грузовика частота колебаний будет меньше, чем у негруженого. Следовательно, выбоины на дороге со стороны въезда груженого автомобиля будут расположены реже, чем со стороны выезда пустого автомобиля.

29. Если на дороге имеется ухаб, пусть даже небольшой, то при проезде через него у автомобиля начинает колебаться передняя его часть. В тех местах, где колебание направлено вниз, шины могут вдавливаться в дорогу. Если в одном и том же месте это происходит со многими автомобилями, то может образоваться еще один ухаб и т.д. Расстояние между ухабами определяется скоростью движения.

30. При рассмотрении ветровых волн на поверхности воды следует обратить внимание на то, что быстрое движение волны – это всего лишь движение волнового фронта, а не частиц воды. Частицы при этом движутся по вертикали (колеблются) и довольно медленно перемещаются по направлению волны.

Зарождаются ветровые волны следующим образом. Ветер дует горизонтально поверхности воды, и даже слабый воздушный поток не является ровным и плавным, в нем всегда присутствуют возможные завихрения. Когда подобный маленький вихрь возникает вблизи воды, давление воздуха на поверхность в данном месте уменьшается. Различие давления в разных точках приводит к возникновению искривления водной поверхности и зарождению ветровой волны. Ветер дует, и давление на образовавшуюся волну с наветренной стороны становится больше, чем давление с подветренной стороны. Волне передается часть энергии ветра; происходит своеобразная «накачка» волны энергией ветра.

В результате высота гребня волны увеличивается; за подветренной стороной гребня возникает завихрение воздушного потока (рис.25). Если ветер дует со

значительной скоростью достаточно долго в одном и том же направлении, возникают штормовые волны.

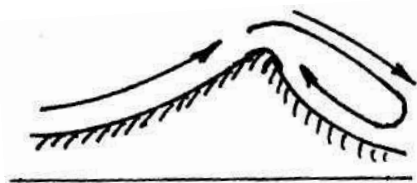


Рис. 25



Рис. 26

По мере приближения морских волн к берегу меняется их картина. Завихрения воздушного потока с подветренной стороны гребня нарушают симметрию волны. Кроме того, подходя к берегу, волны становятся выше и короче, т.е. резко возрастает крутизна волны. Это связано с тем, что энергия у волны та же и количество воды, которое участвует в колебании, такое же, а так как слой воды у берега тоньше, то и поднимается он на большую высоту. При приближении волны к берегу, кроме увеличения ее высоты, верхняя часть гребня волны смещает-

ся вперед сильнее, чем нижняя часть, в результате волна как бы опрокидывается вперед и обрушивается на берег (рис.26).

31. Волны цунами образуются (зарождаются) чаще всего в открытом океане, очень редко в прибрежной зоне, в результате землетрясения, взрыва подводного вулкана или сильного обвала. При этом некоторый участок морского дна быстро смещается вверх или вниз. Поскольку вода практически несжимаема, то почти тотчас сместится столб воды от дна до поверхности моря и на поверхности воды возникнет небольшой холм или впадина. Это и есть очаг цунами; от него, как от брошенного в воду камня, побежит во все стороны волна. Так как участки смещения дна моря обычно довольно большие, то ширина волны цунами тоже довольно большая.

Для волн цунами все моря и океаны являются мелкой водой, поэтому скорость распространения можно определить по формуле Торричелли:  $v = \sqrt{gH}$ , где  $g$  – ускорение свободного падения ( $g=9,8 \text{ м/с}^2$ ),  $H$  – глубина океана. Допустим, что глубина океана равна 5 км, тогда получим скорость, равную 800 км/ч.

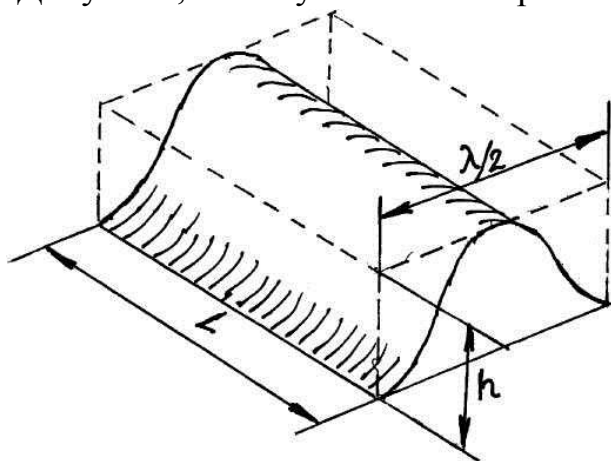


Рис. 27

Когда цунами приближается к побережью, уменьшается скорость (так как глубина становится меньше) и длина волны и начинает расти ее высота. Попробуем оценить увеличение высоты волны, рассуждая следующим образом. Выделим участок волнового фронта шириной  $L$  и определим потенциальную энергию массы волны, поднятую гребнем волны (рис.27). Если бы гребень

волны имел прямоугольную форму (на рис. штриховые линии), то потенциальная энергия равна  $E = mg \frac{h}{2} = \left( \rho \cdot L \cdot \frac{h}{2} \cdot \frac{\lambda}{2} \right) \cdot g \cdot \frac{h}{2} = \frac{1}{8} \rho L g h^2 \lambda$ , где  $m$  – масса воды в объеме гребня,  $\rho$  – плотность воды. Так как при любой глубине энергия волны одинакова, то  $h_1^2 \lambda_1 = h_2^2 \lambda_2$ . С учетом того, что  $\lambda = vT = T \sqrt{gH}$ , находим  $h_1^2 \sqrt{H_1} = h_2^2 \sqrt{H_2}$  или  $h_2 = h_1 \sqrt[4]{\frac{H_1}{H_2}}$ .

Итак, если в открытом океане глубина 5 км и высота волны  $h_1=2$  м, а у берега  $H_2=5$  м, то высота волны у берега  $h_2=11$  м. Заметим, что расчеты приближенные, а более точные расчеты дают высоту волны 30÷50 м.

32. Волны цунами легко распространяются вдоль горных хребтов в глубине океана, так как над горными хребтами меньшее количество воды и поэтому легко возникают колебательные процессы и волны (рис.28). На больших глубинах из-за большого количества воды колебания практически не возникают, а если возникают, то очень слабые. Таким образом, на границе раздела глубин может возникать своеобразное отражение волны вдоль канала, идущего вдоль хребта, т.е. происходит так называемое полное внутреннее отражение.

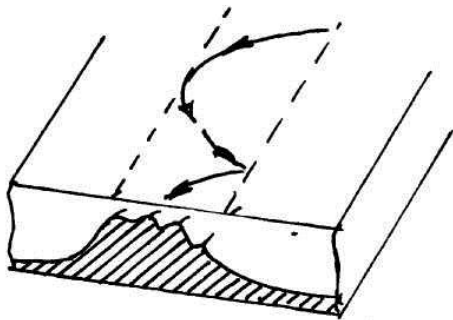
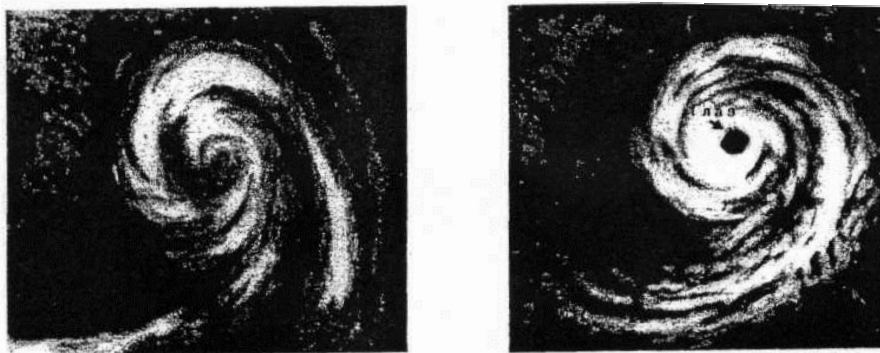


Рис. 28

33. Обычный циклон возникает в результате взаимодействия холодного и теплого фронтов воздуха. Скорость ветра в обычном циклоне, как правило, не превышает 50-70 км/ч, и эти циклоны не причиняют слишком серьезных неприятностей. Иное дело – тропический циклон с его ураганскими ветрами со скоростью 400-500 км/ч, ливнями, большими разрушениями и многочисленными жертвами. По форме обычный и тропический циклоны имеют некоторое различие. Тропический циклон, как показывают съемки из космоса, имеет меньший диаметр и более четкие очертания по сравнению с обычным циклоном. В центре тропического циклона есть небольшое темное пятно – «глаз тайфуна» (рис.29, б), у обычного циклона такого глаза нет (рис. 29, а). В центре тропического циклона давление понижается до 670 мм рт.ст. Сильное снижение давления в центре и относительно малый диаметр области тропического циклона и приводит к тому, что скорость ветра достигает 400-500 км/ч.



а)

б)

Рис. 29

Скорость ветра возрастает по мере приближения к центру циклона. Ветра бешено крутятся, но не могут перейти некоторого предела, оставляя в самом центре циклона область диаметром 10-40 км, где царит тишина – знаменитый глаз циклона. Вдоль границы этой области с внешней стороны возникает особенно сильный восходящий поток теплого воздуха.

Тропические циклоны зарождаются в низких широтах субтропических областей океанов в результате взаимодействия дующих в этих областях постоянных ветров (пассатов) с мощными конвекционными потоками, восходящими над сильно нагретой поверхностью океана. Основным источником энергии тропических циклонов – выделение огромных количеств теплоты при конденсации водяных паров в восходящих потоках воздуха. Восходящие воздушные потоки приводят к образованию мощных грозовых туч. Следует заметить, что тропические циклоны чаще всего возникают летом, в конце его, и в самом начале осени, когда температура воды в океане самая высокая. Изредка они образуются зимой и практически не случаются весной.

При прохождении тайфуна над поверхностью океана в центре тайфуна из-за существенного понижения давления происходит подъем уровня воды на высоту порядка 1 м. Как будто немного! Но надо принять во внимание, что подъем уровня воды происходит сразу на огромной площади (площадь «глаза» тайфуна); такой подъем будет незаметен в открытом океане, но будет очень опасен при приближении волны к побережью («Ох уж эти волны цунами...»). Опасность этих волн еще более усиливается, когда они совпадают с приливными и штормовыми (ветровыми) волнами. В этом случае их высота уже в открытом океане может достигать 20-30 м, не говоря о высоте этих волн у берега.

Кроме того, необходимо иметь в виду, что над поверхностью океана во время тайфуна бушуют сильные ветры и выпадают обильные осадки в виде ливней.

Возникнув, тайфун начинает перемещаться под действием розы ветров в данном месте, а также в результате своеобразного перекачивания в горизонтальной плоскости. Скорость этого перемещения невелика – обычно она составляет десятки километров в час. Иногда циклон может некоторое время зависать над какой-либо местностью. Как правило, циклоны перемещаются в направлениях от низких к более высоким широтам, их траектории могут быть достаточно сложными.

34. На вопрос о том, на каких частотах «работают» сонары у летучих мышей и дельфинов, можно дать ответ, если известно, чем питаются животные. Зная размеры насекомых, которыми питаются летучие мыши, и зная, что отражение сигнала может произойти, если размеры препятствия больше или по крайней мере соизмеримы с длиной волны, можно найти, на каких частотах должен работать сонар. Летучие мыши питаются мелкими летающими насекомыми, размеры которых от 4 мм (комары) до 8-10 мм. Скорость звука в воздухе  $c=340$  м/с, и тогда частота сонара  $\nu = \frac{c}{\lambda} = \frac{340 \text{ м/с}}{0,004 \text{ м}} = 85 \text{ кГц}$  (килогерц). Более крупные мыши имеют частоту сонара около 40 кГц, так как питаются более

крупными насекомыми. Таким образом, во время полета мыши излучают короткие ультразвуковые сигналы с частотами примерно от 40 до 80 кГц.

Эхолокация дельфинов, как и летучих мышей, осуществляется на ультразвуковых частотах от 80 до 100 кГц. Скорость звука в воде равна 1450 м/с, размеры рыбы порядка нескольких сантиметров.

35. Ультразвуковые колебания обеспечивают большую точность локации. Они отражаются от предметов, размеры которых соизмеримы с длиной волны звука. Поэтому ультразвуковые колебания обеспечивают и большую чувствительность локации.

36. У нормально работающего камертона ножки колеблются в противоположных фазах, то есть движутся всегда в противоположные стороны. Поэтому центр тяжести камертона остается неподвижным, и, следовательно, не требуется никаких внешних сил, чтобы такие колебания происходили. Камертон может совершать такие колебания, не имея жесткого крепления.

Если одна из ножек камертона отрезана, а вторая совершает колебания такого же типа, как и прежде, то центр тяжести его не останется неподвижным. Следовательно, чтобы такие колебания происходили, необходимо камертон жестко закрепить (например, рукоятку зажать в тиски). Если же рукоятку держать в руке, то крепление не будет достаточно жестким и колебания прежнего типа не смогут происходить.

Таким образом, наличие двух ножек у камертона делает ненужным жесткое крепление у камертона, т.е. позволяет пользоваться камертоном, держа его рукоятку в руке.

37. Скорость звука в теплом воздухе больше, чем в холодном. Если с увеличением высоты над землей температура воздуха уменьшается, то верхняя часть звуковой волны, распространявшейся вначале горизонтально, будет двигаться медленнее, чем нижняя. Вследствие этого траектория волны загибается вверх. В холодный же день температура воздуха может увеличиваться с высотой (особенно над большими водоемами). Тогда звук отклоняется не вверх, а вниз, распространяясь таким образом на большее расстояние вдоль земной поверхности.

38. Звук распространяется по ветру дальше не потому, что в этом направлении он меньше ослабляется, а потому, что, двигаясь по ветру, звуковые волны отклоняются вниз (рис.30, б, потоки 1), тогда как при движении против ветра они отклоняются вверх (рис. 30, б, потоки 2).

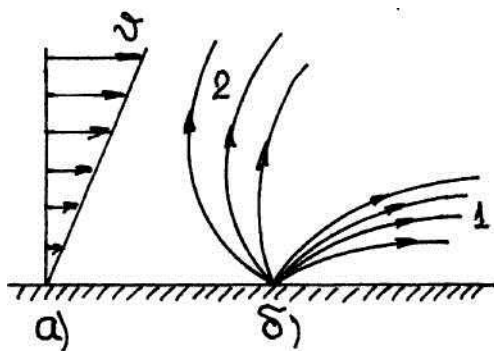


Рис.30

Скорость ветра обычно возрастает с увеличением высоты, так как у поверхности земли на его пути встречаются различные препятствия (рис.30, а). Когда волна распространяется по направлению ветра, она движется вверху с большей скоростью, чем внизу, поэтому в целом отклоняется к низу. Аналогичные рассуждения позволяют понять, почему волна, движущаяся против ветра, отклоня-



ется кверху. Таким образом, в направлении ветра звук идет почти вдоль поверхности земли, а в противоположном направлении уходит от нее.

39. Представим себе плоскость 1, параллельную поверхности земли 2 (рис.31). Звук, идущий от источника взрыва под некоторым углом  $\alpha$  к перпендикуляру (нормали) к этой плоскости, отклоняется дальше на больший угол  $\beta$ . Как следует из закона преломления волн  $\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{v_1}{v_2}$ , это происходит в том случае, когда скорость звука с высотой увеличивается, т.е.  $v_2 > v_1$  (рис. 31). Таким образом, кривая (рис.18), представляющая путь распространения звуковой волны, свидетельствует о том, что скорость звука с высотой непрерывно растет.

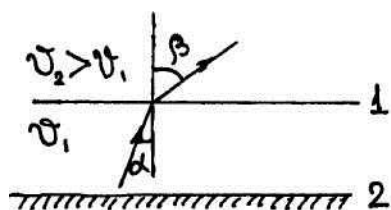


Рис. 31

Так как скорость звука в газе пропорциональна на корню квадратному из температуры ( $v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{\mu}}$ , где  $\gamma$  – показатель адиабаты,  $R$  – газовая постоянная,  $\mu$  – молекулярная масса,  $T$  – температура), то, следовательно, кривая распространения звука объясняется ростом температуры воздуха с высотой.

40. Скорость звуковых волн в воздухе  $v_1 \approx 330$  м/с, а в воде  $v_2 \approx 1500$  м/с. По закону преломления на границе раздела двух сред воздуха и воды имеем:

$$\frac{\sin\alpha_1}{\sin\alpha_2} = \frac{v_1}{v_2}.$$

Следовательно, при вхождении в воду «звуковой луч» отклоняется от перпендикуляра (нормали) на угол преломления  $\alpha_2$  больше  $\alpha_1$ , так как  $v_2 > v_1$  и, соответственно,  $\sin\alpha_2 > \sin\alpha_1$ , тогда  $\alpha_2 > \alpha_1$ . Соотношение скоростей определяет угол  $\alpha_1$ , при котором звуковая волна при падении на границу раздела сквозит вдоль этой границы и не попадает в воду (предельный угол полного внутреннего отражения). Значение предельного угла удовлетворяет условию (при  $\alpha_2 = 90^\circ$ ):

$$\sin\alpha_{\text{пред}} = \frac{v_1}{v_2}.$$

При  $v_1 \approx 330$  м/с и  $v_2 \approx 1500$  м/с имеем  $\sin\alpha_{\text{пред}} = 0,22$  и  $\alpha_{\text{пред}} = 13^\circ$ . При углах  $\alpha$  больше  $\alpha_{\text{пред}} = 13^\circ$  звуковая волна не попадает во вторую среду (в воду), происходит полное внутренне отражение. Такой случай показан на рис.19.

Таким образом, звук попадает в воду, если падает на поверхность воды под углом, меньшим  $\alpha_1$ . Возмущение, вызванное падающей волной, проникает в воду, экспоненциально затухая, тем быстрее, чем больше угол падения волны. Практически возмущение в воде затухает очень быстро. Нередко приходится слышать предупреждение рыболова «Не кричи – распугаешь рыбу». Приведенный расчет показывает, что человек, стоящий на некотором расстоянии от берега, не может «распугать» рыбу, так как звук его голоса вообще не может попасть в воду.

41. Звук – это механические (упругие) волны, распространяющиеся в упругой среде – в газах, жидкостях и твердых телах. В жидкой и газообразной средах звуковые волны характеризуются дополнительным изменением давления и плотности среды. При прохождении и отражении звука на границе разде-

ла жидкость-газ (в нашем случае вода-воздух) давление ведет себя по-разному. В зависимости от направления при отражении звуковой волны в воздухе на границе с водой образуется максимальное давление (пучность), поэтому в проходящей в воду волне давление почти в два раза больше, чем давление в падающей волне. Когда же звуковая волна падает на границу раздела из воды, то на этой границе давление почти равно нулю. Примерные расчеты показали, что при переходе из воды в воздух давление уменьшается в 150 раз. Следовательно, рыбы нас слышат, а мы их нет.

42. При разных скоростях движения жидкости наблюдается два вида течения. В одних случаях (при малых скоростях) жидкость как бы разделяется на слои, которые скользят друг относительно друга, не перемешиваясь. Такое течение называется ламинарным (или слоистым).

При увеличении скорости характер течения жидкости начинает меняться. Возникает течение жидкости, при котором частицы жидкости совершают неустановившиеся беспорядочные движения по сложным траекториям. Такое течение называется турбулентным (или вихревым). При турбулентном течении скорость жидкости и ее давление в каждой точке потока хаотически изменяется. В отличие от ламинарного течения, при турбулентном течении происходит интенсивное перемешивание движущейся жидкости.

Когда открывается водопроводный кран, при увеличении скорости потока в местах сужений в трубах может возникнуть турбулентность, которая приводит в результате интенсивного перемешивания к кавитации (образованию и разрыву пузырьков воздуха). Колебания пузырьков улавливаются трубами, а также стенами, полами, потолками, к которым трубы прикреплены. Иногда шум может быть вызван и периодическими ударами турбулентного потока о препятствия (например, сужение) в трубе.

43. При нагревании воды первый звук появляется, когда дно кастрюли нагревается так, что начинают образовываться пузырьки; образование каждого пузырька сопровождается щелчком, а все вместе они создают шипение. Дальнейшее нагревание приводит к увеличению размеров пузырьков и их отрыву от дна, поднимаясь в более холодные слои воды, они лопаются, при этом возникает еще более громкий звук. Его мы слышим до тех пор, пока вода не нагревается настолько, что пузырьки начинают достигать поверхности и разрываться там. Тогда вода кипит «белым ключом», а пузырьки, лопающиеся на поверхности, создают более мягкий, «плещущий» звук.

44. Воздушная полость, которая образуется в чайнике, если заполнить его водой не полностью, является резонатором звуковых колебаний определенной частоты, то есть усиливает звуковые колебания. Поэтому неполный чайник перед закипанием воды «шумит» сильнее, чем полный.

45. Из шума, который создает вода, наливаемая в бутылку (или выливаемая из бутылки), выделяются и усиливаются те звуки частоты, которые возбуждают резонансные колебания в столбе воздуха в бутылке. Самая низкая из частот звучит громче остальных; ее конкретное значение зависит от объема столба воздуха. Чем больше объем, тем больше резонансная длина волны коле-

бания воздуха и ниже частота. Поэтому когда из бутылки выливают воду, слышимая нами резонансная частота понижается, а при наливании – повышается.

46. Когда мы поем на открытом воздухе, то слышим звуки собственного голоса лишь в тот момент, когда их издаем. В ванной комнате каждый звук многократно отражается от близко расположенных стен, поэтому он слышен дольше; в результате голос приобретает звонкость (обусловленную достаточно продолжительным звучанием высокочастотных составляющих) и сочность (благодаря продолжительному звучанию низкочастотных составляющих).

47. Отчасти журчание ручейка обусловлено пузырьками воздуха, образующимися в быстро текущей воде. Возникновение пузырьков сопровождается слабыми звуками, тогда как колебания объема пузырьков и их «схлопывание» производят более громкие звуки.

48. Качественная оценка звука, издаваемого музыкальным инструментом (тембр звука), зависит от числа и соотношения обертонов, сопутствующих основному тону. Основной тон – это звук определенной частоты, которую создает колеблющаяся струна. Усиливает звук полый корпус. В зависимости от формы корпуса наряду с основным тоном появляются дополнительные колебания (обертоны) более высокой частоты.

Обертоны являются слабыми призвуками, содержащимися почти в каждом музыкальном звуке. Тело, производящее музыкальный звук, например, натянутая струна или столб воздуха внутри полого корпуса духового инструмента, колеблется не только как единое целое, но и по частям, в результате помимо основного тона (т.е. того, который идентифицируется с данным звуком) образуется серия обертонов. Гармонические обертоны образуются в условиях, когда колебания частей тела соотносятся с колебаниями основного тона как целые числа (например, 2:3:4). Частоты негармонических обертонов лежат вне гармонических рядов.

Обертоны накладываются на основной тон и зависят от формы полости и размеров корпуса музыкального инструмента. Набор обертонов, которые определяют «окраску», тембр звука, зависит от формы полого корпуса. С увеличением размеров корпуса понижается тон звука.

49. Когда струну дергают ногтем или медиатором, в ней возбуждается больше высших гармоник (обертонов) (см. «Фигурный корпус скрипки»), чем когда их трогают пальцем. Высокочастотные обертоны (высшие гармоники) и придают звукам балалайки звенящую окраску.

50. Смычок при движении по струне возбуждает в ней поперечные колебания, которые создают изменение плотности воздуха в области колебания струны. Изменение плотности распространяется в пространстве в виде продольных звуковых волн, которые улавливаются ушной раковиной и вызывают вибрацию барабанной перепонки, затем через систему слуховых косточек, жидкостей и других образований передаются воспринимающим рецепторным клеткам.

51. Бокал для вина имеет определенные собственные частоты колебаний. Если певец на протяжении нескольких секунд будет петь на одной из этих ча-

стот, то наступит резонанс колебаний, в результате которого амплитуда достигнет такой величины, что стекло треснет.

52. Дребезжание в стеклах возникает, когда собственная частота колебаний стекол совпадает со звуковыми волнами от проезжающих мимо автомашин. Если в центре стекла прикрепить кусочек пластилина, то увеличится масса стекла, а это приведет к уменьшению собственной частоты колебаний стекла, и тогда исчезнет резонанс между ним и звуком автомашин.

53. «Окраска» или тембр голоса человека определяется длиной и натяжением голосовых связок. При увеличении давления в трахее наступает момент, когда связки резко расходятся, а затем возвращаются в прежнее положение. Продолжительные колебания связок вызывают изменение давления воздуха, которые, в свою очередь, возбуждают резонансные гармоники полости носоглотки. Мужской голос обычно ниже женского, так как у мужчин голосовые связки толще, длиннее и вибрируют с более низкой частотой. Голос мальчиков «ломается» в период быстрого роста; гортань увеличивается, и голосовые связки из детских – тонких и коротких – превращаются в мужские. При шепоте голосовые связки расслабляются и бездействуют, в гортани частота произносимых звуков в этом случае определяется только колебаниями воздушного потока, возникающими из-за наличия других препятствий, а также резонансными частотами носоглотки.

54. Скрип мела и некоторых дверей, визг шин автомобиля во всех случаях обусловлены «зацеплением и соскальзыванием». Так, мел, когда его неправильно держат, сначала зацепляется за доску, и, когда пишущий достаточно сильно нажимает на мел, он внезапно соскальзывает и начинает вибрировать, периодически цепляясь за доску и вновь соскальзывает. Вследствие этого и возможен скрип.

55. Если температура воздуха очень низкая (примерно  $-20^{\circ}\text{C}$ ), то ледяная корка снежного покрова уже не тает под ногами за счет давления, а трескается и под ногами слышен скрип.

56. Когда идет снег, между пушинками свежеснег выпавшего снега существуют маленькие полости, благодаря которым такой снежный покров поглощает звук так же, как звукопоглощающие покрытия в современных помещениях. По мере уплотнения снега поглощение звука в нем ослабляется.

57. Потрескивание обусловлено раскалыванием льда под влиянием температурных напряжений, возникающих в толще льда при нагревании. Шипение же связано с воздушными пузырьками, заключенными внутри льда, которые лопаются, когда в результате таяния льда попадают на поверхность. Если таких пузырьков нет или их очень мало, то лед при таянии будет только потрескивать.

58. Скорость звука в воздухе зависит от температуры; в теплом воздухе она больше, чем в холодном. Если с увеличением высоты над землей температура воздуха уменьшается, то верхняя часть звуковой волны, распространяющейся вначале горизонтально, будет двигаться медленнее, чем нижняя. Вследствие этого траектория волны загибается вверх. В холодный же день температура воздуха может увеличиваться с высотой (особенно над большими водое-

мами). Тогда звук отклоняется не вверх, а вниз, распространяясь, таким образом, на большее расстояние вдоль земной поверхности.

59. При обтекании ветром провода или ветки дерева воздушный поток становится неустойчивым, и тогда с препятствия могут срывать вихри. С телеграфного провода, например, вихри срываются попеременно то с верхней, то с нижней его части. Эти вихри и создают колебания давления воздуха, которые мы воспринимаем как звуки. Если ветер достаточно силен, то колебания давления с двух сторон провода могут заставить его вибрировать целиком; впрочем, колебания провода необязательны для возникновения звука. Шум леса обусловлен колебаниями листьев.

На углах крыш и заостренных предметах при сильном ветре вихри срываются с края препятствия, когда его обтекает воздушный поток. Возникающие при этом колебания края препятствия и создают слышимый нами звук. Частично звук возвращается к источнику воздушного потока. Вследствие чего возникает дополнительная неустойчивость потока, способствующая образованию вихрей. Когда эти вихри достигают края препятствия, они возбуждают звук и т.д.

60. Щелканье бича можно объяснить двумя возможными вариантами: либо кончик бича, изгибаясь, бьет сам по себе, издавая при этом звук, либо, двигаясь быстрее звука, создает ударную звуковую волну (см. «Движение со сверхзвуковой скоростью»).

61. Пуля при выстреле из винтовки или автомата движется со скоростью больше скорости звука в воздухе, вследствие чего образуется ударная волна, которая и создает звуковые колебания. Если пуля летит с небольшой скоростью, то ударная волна не создается и пуля летит бесшумно.

62. Звук в земле и металле распространяется быстрее, чем по воздуху, поэтому, прильнув ухом к земле или рельсам, можно услышать далекий топот копыт и далекий стук колес поезда. Но это обстоятельство не основное, более существенным является то, что звук лучше проходит в земле и металле потому, что там он меньше рассеивается, чем в атмосфере.

63. Когда самолет пролетает над землей с дозвуковой скоростью, на поверхности земли слышен шум двигателей, так как звук от двигателя приходит на землю быстрее, чем летает самолет. Если самолет летит со скоростью больше скорости звука, то впереди него образуется ударная волна (скачок уплотнения воздуха) конической формы. Этот конус, расширяясь, достигает поверхности земли со сверхзвуковой скоростью, где возникает скачок давления, воспринимаемый как звук хлопка или выстрела, после которого уже слышен шум двигателя. Иногда можно услышать второй хлопок от ударной волны, создаваемой хвостом самолета.

64. Частота слышимого звука зависит от скорости источника звука относительно наблюдателя. Изменение частоты звука при движении источника называется эффектом Доплера. При неподвижном источнике (точка А на рис.32) за время, равное периоду колебаний  $T$ , колебание распространяется на расстояние, равное длине волны  $\lambda_0 = vT$ , где  $v$  – скорость звука в данной среде. Если же источник (точка В, рис.32) движется со скоростью  $u$ , то за время  $T$  он

пройдет в направлении распространения волны путь  $uT$ , и колебание распространяется за это время на расстояние  $\lambda = \lambda_0 - uT = (v - u)T$ . При удаляющемся источнике  $\lambda = (v + u)T$ . Таким образом, частота колебаний, воспринимаемых ухом неподвижного человека от движущегося источника звука,  $\nu = \frac{v}{\lambda} = \nu_0(1 \pm \frac{u}{v})$ . Знаку плюс соответствует приближение источника, то есть частота повышается, а знаку минус – удаление, то

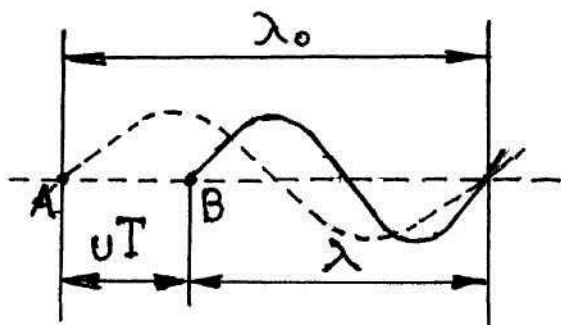


Рис. 32

есть частота понижается.

Таким образом, когда гоночный автомобиль приближается к неподвижному наблюдателю, частота «рева» его двигателя, воспринимаемая наблюдателем, повышается, когда же автомобиль удаляется от наблюдателя, частота понижается. То же самое происходит и со звуком, который издает летящий снаряд. Повышение частоты звука говорит о том, что снаряд приближается, понижение – об удалении снаряда.

65. При переходах звуковой волны из воздуха в стекло и из стекла в воздух происходит ее отражение, вследствие чего доля энергии, проникающей в комнату, сильно уменьшается, а при тройном остеклении практически сводится к нулю.

66. При одинаковой силе удара в дверь и стенку дверь больше деформируется, поэтому амплитуда ее колебаний больше, а так как громкость звука определяется именно амплитудой, то стук в дверь будет громче. По звуку можно определить, какая дверь тоньше; тоньше будет та дверь, которая при стуке в нее издает более громкий звук.

67. При разряде молнии гром возникает вследствие резкого расширения воздуха при быстром повышении температуры в канале разряда молнии. Вспышку молнии мы видим практически мгновенно, так как скорость света очень большая – 300000 км/с. У звука скорость распространения около 330 м/с. По паузе между вспышкой света и громом можно определить, как далеко от нас в данный момент находится грозовой разряд.

Раскаты грома иногда слышны несколько секунд по двум причинам. Во-первых, молния имеет большую длину и звук от разных участков доходит до нас в разные моменты времени. Во-вторых, и это приводит к более продолжительным раскатам, так как происходит отражение звука от облаков и туч, то есть возникает эхо. Заметим, что отражение звука от облаков иногда приводит к усилению громкости звука в конце громовых раскатов.

68. Инфразвук большой интенсивности может привести в колебательное движение грудную клетку; вызываемые инфразвуком изменения давления воздуха происходят достаточно медленно, так что грудная клетка успевает колебаться в такт с ними. При малых колебаниях возникает трение между внутренними органами, что может привести к внутреннему кровоизлиянию. При малых интенсивностях инфразвук нередко вызывает головокружение и тошноту.

«Укачивание» в автомобиле отчасти также обусловлено возбуждаемым при его движении инфразвуком.

69. Чтобы понять, как жужжат насекомые, необходимо разобраться, что такое звук и как мы его слышим. Звук – это распространяющиеся в виде волн колебательное движение частиц упругой среды: газообразной, жидкой и твердой (упругие волны).

Источниками звука могут быть любые явления, вызывающие возмущение упругой среды, т.е. местное отклонение давления, плотности или механического напряжения от равновесного значения или локальные смещения частиц из положения равновесия. Звуковые волны действуют на орган слуха человека и животных.

Жужжание насекомых, слышимое только при их полете, обусловлено тем, что, летая, насекомые взмахивают крылышками несколько сотен раз в секунду. Эти взмахи являются тем самым возмущением упругой среды (воздуха), которое воспринимается как звуковые волны. Крылышко – это колеблющаяся пластинка, которая порождает тон определенной высоты.

Определив высоту (частоту) издаваемого насекомым тона, можно узнать, сколько взмахов делает в секунду при полете то или иное насекомое. Проведенные исследования показали, что частота взмаха крыльев у каждого насекомого почти неизменна; регулируя полет, насекомое изменяет лишь величину взмаха (амплитуду колебаний и наклон крыльев); число взмахов в секунду увеличивается только при понижении температуры.

Найдено, что комнатная муха делает в секунду 350 взмахов крылышками, шмель – 250. Пчела взмахивает крыльями 440 раз в секунду в свободном полете и всего 330 раз, когда летит с медом. Жуки издают более низкие тона, а вот комар делает крылышками 500-600 колебаний в секунду.

70. Казалось бы, зритель в концертном зале должен услышать первый аккорд пианиста раньше телезрителя, который смотрит концерт по телевизору, так как он находится ближе к источнику звука. Однако, как ни странно, телезритель услышит первый аккорд раньше. Дело в том, что скорость звука в воздухе равна около 340 м/с, а скорость радиоволн – 300 тыс. км/с. И поэтому легко посчитать, сколько времени необходимо для распространения звука к человеку: в зале  $30 \text{ м} / 340 \text{ м/с} \approx 0,1 \text{ с}$ ; радиоволны проходят 300 км за  $300 \text{ км} / 300000 \text{ км/с} \approx 0,001 \text{ с}$ . Таким образом, передача звука по телевизору потребует почти в 100 раз меньше времени, чем передача звука по воздуху. Однако такой ответ будет верным, если микрофон, который будет передавать сигнал, будет находиться рядом с роялем.

71. Антенны автомобильных радиостанций расположены вертикально. Автомобильный приемник обычно принимает прямой сигнал передающей станции, в котором электрическое поле ориентировано вдоль передающей антенны, то есть вертикально. Для того, чтобы мощность принимаемого сигнала была максимальна, приемная антенна тоже должна быть вертикальной.

72. Короткие волны распространяются на большие расстояния в результате многократных отражений от поверхности земли и от проводящих слоев атмосферы (ионосферы), что приводит к возникновению зон молчания.

73. Длинные и средние радиоволны принимаются после отражения от ионосферы. Степень отражения этих волн увеличивается ночью, так как в отсутствие прямого солнечного света ионизация молекул в нижнем слое ионосферы уменьшается. Вследствие этого увеличивается ее отражающая способность для более длинных волн и содействует их распространению на значительные расстояния.

74. При прохождении радиоволн в морской воде происходит сильное поглощение электромагнитных волн. Поэтому осуществить связь с подводной лодкой, находящейся под водой, практически невозможно.

75. Короткие, средние и длинные радиоволны принимаются после отражения от ионосферы (см. «Дальность приема радиосигнала ночью»). Ультракороткие волны, на которых осуществляются телепередачи, распространяются только по прямой, потому что ионосфера для этих волн прозрачна, а наземные препятствия они почти не огибают.

76. Кажется, что военнослужащие маршируют не в такт с музыкой, так как наблюдая за ними издали, мы видим, как военнослужащие делают движение гораздо раньше, чем до нас доходит соответствующий движению такт музыки. Дело в том, что движение мы видим значительно раньше, чем слышим звук (скорость света 300 тыс. км/с, а звука – 340 м/с).

77. Лампа накаливания, питаемая переменным током, светит не мигая вследствие так называемой «тепловой инерции». Ее раскаленная нить не может отзываться на быстрые изменения напряжения, число которых у переменного тока равно 100 циклам в секунду (при частоте переменного тока, равного 50 Гц). Не успевая остывать за малые доли секунды, нить излучает ровный свет.

78. Длина волны, соответствующая красному цвету, равна примерно 0,78 мкм, зеленому цвету соответствует длина волны около 0,55 мкм. Таким образом, изменение длины волны вследствие эффекта Доплера должно было бы составить  $0,55/0,78=0,7$ .

Это означает, что частота электромагнитных колебаний, попадающих в глаз водителя, должна возрасти в  $1/0,7=1,42$  раза. Такое увеличение частоты возможно лишь при скоростях, примерно во столько же раз меньше скорости света, которые для автомобиля, естественно, недопустимы ( $\approx 210000$  км/с). Минимальная скорость, при которой начинает обнаруживаться эффект Доплера для света с помощью чувствительных оптических приборов, составляет 500 м/с, что так же лежит далеко за возможностями автомобиля.

79. Груз, подвешенный на нити, является математическим маятником, период колебаний которого определяется по формуле  $T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$ . Следовательно, при уменьшении длины шнура уменьшается период колебаний.



Борисовский Василий Васильевич

## КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

(теория и практика)

Учебное пособие для студентов  
всех направлений

Редактор Е.Ф. Изотова

Подписано к печати 24.03.14. Формат 60x84/16.

Усл. печ. л. 3,0. Тираж 50 экз. Зак. 141251. Рег. № 104.

Отпечатано в РИО Рубцовского индустриального института  
658207, Рубцовск, ул. Тракторная, 2/6.