§ 9. Механические колебания и волны

Изменения состояния движения физической системы, которые многократно повторяются через определенные промежутки времени, называют *колебательным движением* или просто *колебаниями*. Если эти изменения повторяются через одинаковые промежутки времени, колебания называются *периодическими*.

Простейшим видом механического колебательного движения являются *гармонические колебания*, в которых колеблющаяся физическая величина (например, координата материальной точки x) изменяется с течением времени по закону косинуса или синуса:

$$x = A\cos\left(\omega_0 t + \alpha_0\right) \text{ или } x = A\sin\left(\omega_0 t + \alpha_1\right),$$

где A и α_0 – постоянные величины, зависящие от начальных условий, $\alpha_1 = \alpha_0 + \dfrac{\pi}{2}$. Смещение x изменяется в пределах от $-A$ до $+A$. Величина A, равная максимальному отклонению от состояния равновесия, называется *амплитудой гармонических колебаний*. Амплитуда A для гармонических колебаний – постоянная положительная величина.

Величина $\left(\omega_0 t + \alpha_0\right)$ называется *фазой колебаний*. Постоянная α_0 – *начальная фаза* или фаза в момент времени $t = 0$. Фаза колебаний определяет смещение x и направление смещения колебаний точки в данный момент времени.

Величина ω_0 называется *циклической*, или *круговой частотой* колебаний.

Частотой периодических колебаний ν называется число полных колебаний, которые совершаются за единицу времени:

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

Циклическая (круговая) частота периодических колебаний ω_0 равна числу колебаний, совершаемых за 2π секунд:

$$\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T},$$

откуда

$$T = \frac{2\pi}{\omega}.$$

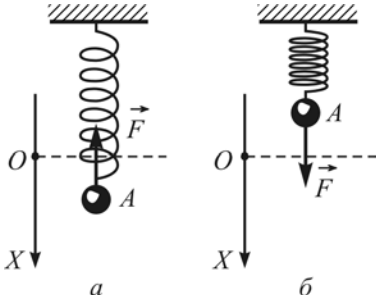

Рис. 9.1

Колебания, происходящие в системе при отсутствии внешних воздействий после какого-нибудь начального отклонения ее от состояния равновесия, называются *свободными* или *собственными*. Если в системе отсутствует переход механической энергии в другие ее виды (консервативная система), то свободные колебания будут *незатухающими*.

Пружинным маятником называют колебательную систему, состоящую из тела массой *m*, подвешенного на пружине *жесткостью* k. Такая колебательная система будет совершать гармонические колебания с периодом

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}. \qquad (9.1)$$

Если начало координат совпадает с положением равновесия пружинного маятника, а ось *OX* направлена вниз (рис. 9.1), то по закону Гука

$$F = -kx,$$

где F – действующая сила, x – абсолютное смещение маятника. По второму закону Ньютона $ma = F$. Откуда

$$a = \frac{F}{m} = -\frac{k}{m}x = -\omega_0^2 x,$$

где $\omega_0^2 = \frac{k}{m}$.

Математический маятник представляет собой небольшой массивный груз, подвешенный на нерастяжимой невесомой нити (или легком стержне) длиной l и совершающий колебания под действием силы тяжести. Период колебаний математического маятника

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}} \qquad (9.2)$$

не зависит от массы маятника и амплитуды его колебаний.

Физическим маятником называют твердое тело, совершающее колебания под действием силы тяжести вокруг горизонтальной оси подвеса. Период колебаний физического маятника

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{I}{mgl}}\,, \qquad (9.3)$$

где I – момент инерции маятника относительно горизонтальной оси, проходящей через точку O (рис. 9.2); l – расстояние между точкой подвеса и центром масс.

Из сравнения формул (9.2) и (9.3) следует, что математический маятник длиной $L = \frac{I}{ml}$ будет иметь такой же период, как и данный физический маятник. Величину L называют *приведенной длиной физического маятника*. Точка O_1 на продолжении прямой, соединяющей точку подвеса с центром инерции, находящаяся на расстоянии приведенной длины от оси вращения, называется *центром колебаний физического маятника*.

Отметим, что формулы (9.2) и (9.3) справедливы для малых колебаний маятников (угол отклонения от положения равновесия не превышает 3–5°). Для больших углов периоды колебаний определяются более сложными формулами.

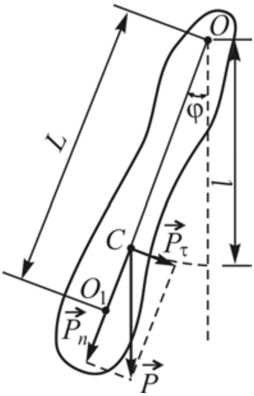

Рис. 9.2

Крутильные колебания – механические колебания, при которых упругие элементы испытывают деформацию сдвига. Период крутильных колебаний

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{I}{D}}\,,$$

где I момент инерции крутильного маятника относительно оси вращения (рис. 9.3); $D = \frac{G\pi r^4}{2l}$ – коэффициент упругости при

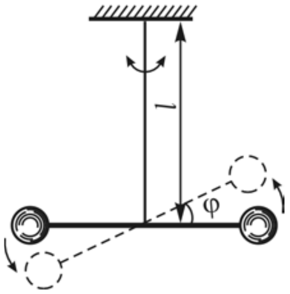

Рис. 9.3

деформации кручения (G – модуль сдвига материала проволоки; φ – угол закручивания; r и l – радиус и длина проволоки).

Период колебаний однородной струны

$$T = 2l\sqrt{\frac{m_л}{F}},$$

где l – длина струны, $m_л$ – масса единицы длины струны (линейная плотность), F – сила натяжения струны.

Уравнение *затухающих колебаний* и его решение:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\delta\frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = 0,$$

$$x = A_0 e^{-\delta t}\cos(\omega t + \varphi),$$

где $\delta = \dfrac{r}{2m}$ – *показатель затухания* (r – *коэффициент сопротивления среды*); $\omega_0^2 = \dfrac{k}{m}$ (ω_0 – частота собственных колебаний); ω – частота затухающих колебаний ($\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$); A_0 – *начальная амплитуда колебаний*.

Показатель затухания δ характеризует, как быстро уменьшается амплитуда.

Период затухающих колебаний:

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{k}{m} - \frac{r^2}{4m^2}}} > T_0 = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{k}{m}}},$$

где T_0 – *период свободных колебаний*.

Логарифмический декремент затухания

$$\theta = \ln\frac{A_0 e^{-\delta T}}{A_0 e^{-\delta(t+T)}} = \delta T.$$

Зная θ и пользуясь соотношением $\frac{r}{m} = 2\delta$, можно определить коэффициент сопротивления

$$r = 2\delta m = 2\frac{\theta}{T}m .$$

Время, за которое амплитуда колебаний уменьшается в e раз, найдем из соотношения:

$$\frac{A_0}{A_\tau} = e^{\delta\tau} = e .$$

Откуда

$$\delta\tau = 1 \text{ или } \tau = \frac{1}{\delta}.$$

Амплитуда вынужденных колебаний при действии вынуждающей силы $F = F_0 \cos\omega t$:

$$A = \frac{f_0}{\sqrt{\left(\omega_0^2 - \omega^2\right)^2 + 4\delta^2\omega^2}} ,$$

где $f_0 = \frac{F}{m}$, $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$.

Частота внешней периодической силы, при которой наблюдается максимум амплитуды вынужденных колебаний, определяется соотношением $\omega_{\text{рез}} = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$ и называется *резонансной частотой*.

Амплитуда при *резонансе* определяется формулой

$$A_{\text{рез}} = \frac{F_0}{2\delta m\sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}} .$$

Одной из основных характеристик колебательной системы является добротность Q, которая определяется отношением энергии, накопленной в колебательной системе, к энергии, которую расходует система за один период колебаний.

В механической системе массой *m*, жесткостью *k* и коэффициентом сопротивления среды *r* добротность колебательной системы определяется соотношением

$$Q = \frac{\omega_0 m}{r}.$$

Полная энергия материальной точки массой *m*, которая совершает незатухающие гармонические колебания, выражается формулой

$$E = E_{\text{к}} + E_{\text{п}} = \frac{1}{2} m\omega_0^2 A^2,$$

которая, как видно, не зависит от состояния системы. В этой формуле

$$E_{\text{к}} = \frac{1}{2} m\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 = \frac{1}{2} m\omega_0^2 A^2 \sin^2\left(\omega_0 t + \alpha_0\right) -$$

кинетическая энергия системы,

$$E_{\text{п}} = \frac{kx^2}{2} = \frac{1}{2} kA^2 \cos^2\left(\omega_0 t + \alpha_0\right) -$$

потенциальная энергия ($k = m\omega_0^2$).

Процесс распространения колебательного движения в упругой среде называется *волновым процессом* или просто *волной*.

Уравнение плоской монохроматической бегущей волны можно записать следующим образом:

$$\chi = A\sin\omega\left(t - \frac{x}{\upsilon}\right) = A\sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{\upsilon T} x\right) = A\sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} x\right),$$

где x – координата точки среды относительно центра колебаний, которую достиг волновой процесс в момент времени *t*; υ – скорость распространения некоторой *фазы колебаний (фазовая скорость)*; λ *– длина волны*.

Величину $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ называют *волновым числом*. Это число показывает, сколько длин волн укладывается на отрезке длиной 2π метров или на какой угол изменится фаза колебаний, если волна переместится на 1 м в сторону распространения.

Запишем уравнение волны в виде:

$$\chi = A\sin\omega\left(t - \frac{x}{\upsilon}\right) = A\sin(\omega t - \alpha),$$

где $\alpha = \frac{\omega x}{\upsilon} = \frac{2\pi x}{\lambda}$. Величина α постоянна для данной точки пространства и называется *начальной фазой колебаний* в этой точке.

Скорость распространения волны $\upsilon = \lambda\nu$. Это уравнение часто называют *дисперсионным уравнением для скорости* υ.

Скорость распространения продольных волн в тонких упругих стержнях:

$$\upsilon_{\parallel} = \sqrt{\frac{E}{\rho}},$$

где E – модуль Юнга среды, ρ – ее плотность.

Скорость распространения поперечных волн в упругих стержнях:

$$\upsilon_{\perp} = \sqrt{\frac{G}{\rho}},$$

где G – модуль сдвига.

Количество энергии, переносимой волной за одну секунду через площадку в один квадратный метр, размещенную перпендикулярно направлению распространения волн, называют *плотностью потока энергии* φ волны.

$$\varphi = \frac{1}{2}\rho A^2\omega^2\upsilon.$$

Часто эту энергетическую характеристику называют *интенсивностью волны*.

Скорость распространения звука в газе

$$\upsilon = \sqrt{\gamma\frac{RT}{M}},$$

где $\gamma = \frac{C_p}{C_V}$ – коэффициент Пуассона (отношение *теплоемкости при постоянном давлении* C_p к *теплоемкости при постоянном объеме*

C_V); R – универсальная газовая постоянная; T – абсолютная температура; M – молярная масса газа.

Уровень громкости звука в децибелах (дБ):

$$L = 10\lg\frac{I}{I_0},$$

где I – интенсивность звука, I_0 – интенсивность на *пороге слышимости*.

Колебания

9.1. Амплитуда гармонических колебаний равна 75 мм, период 4,0 с и начальная фаза $\pi/4$. Запишите уравнение этого колебания. Определите смещение колеблющейся точки от положения равновесия при $t = 0$ и при $t = 1,5$ с.

9.2. Точка колеблется гармонически по закону $x = A\cos(\omega t + \alpha)$. Найдите максимальные значения скорости и ускорения.

9.3. Через сколько времени от начала движения точка, совершающая колебательное движение по уравнению $x = 9\sin 0,4\pi t$, проходит путь от положения равновесия до максимального смещения; до половины максимального смещения?

9.4. Гармонические колебания совершаются вдоль оси X по закону $x = A\sin\left(\omega t - \frac{\pi}{4}\right)$. Постройте примерные графики смещения x, проекции скорости υ_x и проекции ускорения a_x как функций времени t.

9.5. Материальная точка совершает гармонические колебания с периодом 2,0 с. Движение начинается из положения $x_0 = 0,50A$, где A – амплитуда колебаний, а через 1/2 периода после начала движения точка находится в положении $x = 0,50$ м. Запишите уравнение движения точки.

9.6. Постройте график зависимости скорости гармонического колебания $x = 4,0\cos(2\pi t + \alpha)$ от смещения x.

9.7. Средняя скорость движения поршня двигателя внутреннего сгорания $\langle \upsilon \rangle = 20$ м/с. Ход поршня $h = 10$ см. Какие колебания совершает поршень и чему равен их период?

9.8. Принимая движение поршня в двигателе внутреннего сгорания за гармоническое колебание, определите силу F, действующую на коленчатый вал со стороны поршня, когда он находится в мертвой точке, если масса поршня $m = 0,50$ кг, частота оборотов коленчатого вала $\nu = 180$ мин$^{-1}$, ход поршня $h = 12$ см.

9.9. Во сколько раз время прохождения колеблющейся точкой первой половины амплитуды меньше, чем время прохождения второй половины?

9.10. Материальная точка массой 10 г колеблется по закону $x = 0,05\sin\left(0,6t + 0,8\right)$. Найдите максимальную силу, действующую на точку, и полную энергию колеблющейся точки.

9.11. Материальная точка совершает колебания по закону $x = A\sin\left(1,5\pi t + \dfrac{\pi}{6}\right)$. В какой момент времени ее потенциальная энергия равна кинетической?

9.12. Амплитуда гармонических колебаний материальной точки $A = 15$ см, полная энергия колебаний $E = 25$ мкДж. При каком смещении от положения равновесия на колеблющуюся точку действует сила $F = 50$ мкН?

9.13. Точка совершает гармонические колебания с периодом $T = 0,50$ с и амплитудой $A = 8,0$ см. Определите среднюю скорость точки за время, в течение которого она смещается на расстояние, равное $A/2$, из крайнего положения; из положения равновесия.

9.14. К пружине подвешен груз массой 10 кг. Зная, что пружина под влиянием силы в 0,50 Н растягивается на 1,5 см, определите период вертикальных колебаний груза.

9.15. Тело массой m совершает колебания по закону $x = A\cos\omega t$. Определите силу, действующую на тело, и его максимальную кинетическую энергию.

9.16. Один из двух математических маятников совершил $N_1 = 10$ колебаний, другой за это же время – $N_2 = 8,0$ колебаний.

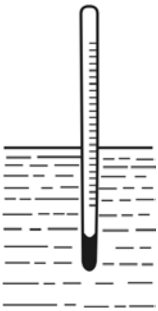

Рис. 9.4

Разность длин маятников составляет $\Delta l = 18$ см. Определите длины маятников и периоды их колебаний.

9.17. Как изменится период колебаний маятника, установленного в ракете, если она начнет двигаться вертикально вверх с ускорением $a = 30$ м/с^2?

9.18. При отклонении из положения равновесия ареометр в сосуде с водой (рис. 9.4) совершает гармонические колебания с периодом $T_1 = 1,0$ с. Каков будет период колебания ареометра в спирте? Сопротивлением среды пренебречь.

9.19. Определите период колебаний математического маятника, установленного на тележке, скатывающейся с наклонной плоскости с углом наклона $\alpha = 30°$, если в неподвижном состоянии период его колебаний $T = 0,70$ с.

9.20. Определите период малых колебаний ареометра, которому сообщили небольшой толчок в вертикальном направлении, в касторовом масле, если масса ареометра $m = 40$ г, радиус его трубки $r = 3,5$ мм. Сопротивление жидкости считать пренебрежимо малым.

9.21. Часы с маятником длиной $l = 1,0$ м за сутки отстают на $\Delta t = 15$ мин. Что нужно сделать с маятником, чтобы часы не отставали?

9.22. Часы отрегулированы на широте, где ускорение свободного падения равно $g = 9,79$ м/с^2. При каком ускорении свободного падения часы будут уходить вперед на $\Delta t = 30,0$ с за сутки?

9.23. Маятник длиной $l = 0,80$ м подвешен к потолку вагона, движущегося горизонтально по прямой с ускорением $a = 1,5$ м/с^2. Определите положение равновесия и период колебаний маятника.

9.24. Определите момент инерции тела массой $m = 4,0$ кг, совершающего колебания с периодом $T = 1,2$ с, если расстояние от точки подвеса до центра масс $l = 0,70$ м.

9.25. После падения с высоты h на чашку пружинных весов тело массой m вместе с чашкой совершает гармонические колебания в вертикальном направлении (рис. 9.5). Пренебрегая массой чашки и пружины, определите амплитуду колебаний механической системы и ее энергию, если жесткость пружины k.

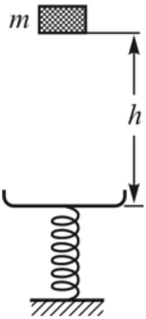

Рис. 9.5

9.26. Маятник, представляющий собой груз массой $m = 2{,}0$ кг, подвешенный на невесомой нити длиной $l = 1{,}5$ м, совершает колебательное движение с амплитудой $A = 50$ см. Определите кинетическую энергию маятника при его прохождении через положение равновесия и при смещении относительно положения равновесия на $s = 30$ см.

9.27. Закрепленная на концах струна длиной $l = 1{,}0$ м растянута с силой $F = 1{,}2$ Н. К середине струны прикреплен точечный груз массой $m = 10$ г. Определите период малых колебаний груза. Массой струны и силой тяжести точечного груза пренебречь.

9.28. Алюминиевый шарик, подвешенный к пружине, совершает вертикальные колебания. Как изменится период колебаний, если к пружине подвесить вместо алюминиевого шарика стальной такого же радиуса?

9.29. Определите относительное изменение периодов колебаний $\Delta T/T$ математического маятника, колеблющегося в следующих условиях: на башне, высота которой над уровнем моря $H = 500$ м, и в шахте глубиной $h = 1{,}5$ км. Влиянием притяжения башни пренебречь.

9.30. Часы, ход которых регулируется математическим секундным маятником, точно идут на экваторе. Определите поправку за сутки для этих часов в Минске ($\varphi = 54°$).

9.31. Определите логарифмический декремент затухания математического маятника, если за время $t = 40$ с амплитуда его колебаний уменьшилась в три раза? Длина маятника $l = 0{,}90$ м.

9.32. Тело массой m скользит по гладкому горизонтальному столу и растягивает пружину, с помощью которой оно крепится к стене (рис. 9.6). Определите наибольшее ускорение тела, если его

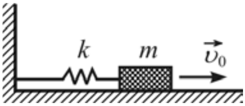

Рис. 9.6

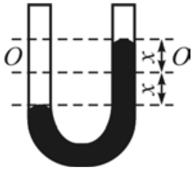

Рис. 9.7

скорость при нерастянутой пружине была равна υ_0 . Жесткость пружины k.

9.33. Период колебаний крутильного маятника, состоящего из диска, соединенного спиральной пружиной с осью вращения, равен $T = 6{,}0$ с. Определите его момент инерции, если жесткость пружины $k = 5{,}0 \cdot 10^{-2}$ Н·м. Трением пренебречь.

9.34. Определите период колебаний столбика ртути в U-образной трубке при выведении его из положения равновесия (рис. 9.7), если площадь сечения трубки 40 мм^2, масса ртути 180 г.

9.35. Маятниковые часы на экваторе идут точно. Уйдут ли они вперед или отстанут (и насколько в сутки), если их перенести на полюс?

9.36. С какой целью на морских судах устанавливают демпфирующие устройства? Приведите пример такого устройства.

Волновое движение. Акустика

9.37. Уравнение незатухающих колебаний имеет вид $x = 0{,}5\cos\pi t$. Запишите уравнение волны для точки, отстоящей на расстоянии $r = 200$ м от источника колебаний, если скорость распространения колебаний $\upsilon = 300$ м/с.

9.38. Определите скорость распространения волны, если частота колебаний 400 Гц, расстояние между точками $\Delta r = 5{,}0$ см, а разность фаз колебаний в этих точках $\Delta\alpha = \pi/4$.

9.39. Определите разность фаз между точками звуковой волны в металле, где скорость звука 5,0 км/с и расстояние между точками 16 м, если длина этой волны в воздухе 30 см.

9.40. Два когерентных источника колеблются в одинаковых фазах с частотой 250 Гц. Скорость распространения колебаний в среде 1,5 км/с? Определите, при какой наименьшей разности волновых путей в области наложения волн от источников будет наблюдаться: а) максимальное усиление колебаний; б) максимальное ослабление.

9.41. Маяк посылает кораблю одновременно два сигнала: первый – звуковыми волнами в воздухе при температуре 27 °С, второй – в воде при температуре 20 °С. На корабле первый сигнал был услышан через 7,0 с после второго. Определите расстояние от корабля до маяка, если скорость звука в воде 1460 м/с.

9.42. Определите длину алюминиевой трубы, если звук от удара по трубе у одного конца слышен у другого конца дважды с интервалом времени $\Delta t = 0,40$ с. Скорость звука в воздухе $\upsilon_1 = 340$ м/с, в алюминии $\upsilon_2 = 5,1$ км/с.

9.43. Почему часто механики, проверяя работу двигателя, прикладывают один конец металлической трубки к корпусу двигателя, а другой – к уху?

9.44. В некоторой среде распространяется волна. За время, в течение которого частица среды совершает 120 колебаний, волна распространяется на расстояние 90 м. Определите длину волны.

9.45. Какова длина бегущей волны, если разность фаз колебаний точек, находящихся на расстоянии $\Delta x = 0,05$ м, составляет $\Delta\alpha = \pi/6$?

9.46. Определите модуль Юнга металла, если скорость звука в этом металле $\upsilon = 4,7$ км/с, а его плотность $\rho = 8,6 \cdot 10^3$ кг/м^3.

9.47. Звуковые колебания, имеющие частоту $\nu = 440$ Гц и амплитуду $A = 0,30$ мм, распространяются в воздухе. Длина волны $\lambda = 0,80$ м. Определите: 1) скорость распространения колебаний, 2) максимальную скорость частиц воздуха.

9.48. Смещение от положения равновесия точки, находящейся на расстоянии 4,0 см от источника колебаний, в момент $t = T/6$ равно половине амплитуды. Определите длину бегущей волны.

9.49. Определите натяжение стальной струны длиной 0,50 м и диаметром 0,20 мм, если известно, что она настроена в унисон с камертоном, частота которого 440 Гц.

9.50. Эхо, вызванное ружейным выстрелом, дошло до стрелка через $t = 3,0$ с после выстрела. На каком расстоянии l от наблюдателя находится преграда, от которой произошло отражение звука? Скорость υ звука в воздухе принять равной 340 м/с.

9.51. Во сколько раз изменяется длина ультразвуковой волны при переходе волны из стали в медь, если скорости распространения ультразвука в меди и стали соответственно 3600 и 5500 м/с?

9.52. Собственная частота колебаний стальной струны $\nu = 7,0$ Гц. Определите длину струны, если ее диаметр $d = 0,50$ мм, а натяжение $F = 0,20$ Н.

9.53. Автомобиль движется соскоростью υ мимо длинной стены под углом α к ней. В момент, когда расстояние до стены равно l, автомобиль подает звуковой сигнал (рис. 9.8). Какое расстояние проедет он до момента, когда шофер услышит эхо? Скорость звука u.

9.54. С какой частотой вращается сирена, имеющая 50 отверстий и издающая звук с длиной волны 0,30 м?

9.55. Определите разность фаз между колебаниями двух точек среды, находящихся на расстоянии $\Delta r = 15$ см друг от друга, если в среде распространяется плоская волна вдоль линии, соединяющей эти точки. Скорость распространения волны $\upsilon = 340$ м/с, частота колебаний источника $\nu = 1,5$ кГц.

9.56. Какую разность фаз будут иметь колебания двух точек, находящихся на расстоянии соответственно 10 и 15 м от источника колебаний? Период колебаний 50 мс и скорость распространения колебаний 300 м/с.

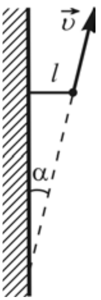

Рис. 9.8

9.57. Могут ли космонавты при выходе в открытый космос общаться между собой при помощи звуковой речи?

9.58. Звуковая волна с периодом $T = 15$ мс распространяется в воздухе. Определите длину волны и разность фаз в двух точках, находящихся на одной прямой с источником волны на расстоянии $\Delta l = 1,5$ м одна от другой. Скорость звука в воздухе принять равной $\upsilon = 340$ м/с.

9.59. Звук выстрела и пуля одновременно достигают высоты $H = 680$ м. Какова начальная скорость пули? Выстрел произведен вертикально вверх; сопротивление движению пули не учитывать. Скорость звука υ принять равной 340 м/с.

9.60. На каком расстоянии от источника колебаний, совершаемых по закону синуса, в момент времени $t = T/2$ смещение точки от положения равновесия равно половине амплитуды? Скорость распространения колебаний $\upsilon = 340$ м/с, период колебаний $T = 1$ мс.

9.61. Чему равна частота основного тона закрытой с одного конца трубы длиной $l = 1,2$ м, если она заполнена водой? Скорость распространения звука в воде $\upsilon = 1460$ м/с.

9.62. Определите скорость звука в воде, если колебания с периодом $T = 5,8$ мс вызывают звуковую волну длиной $\lambda = 8,5$ м.

9.63. Определите отношение молярных теплоемкостей воздуха $\gamma = C_p/C_V$, если его молярная масса $M = 29 \cdot 10^{-3}$ кг/моль, а скорость звука в воздухе при температуре $T = 293$ К равна $\upsilon = 343$ м/с.

9.64. К верхнему концу цилиндрического сосуда высотой 1,0 м, в который наливают воду, поднесли камертон, звучащий с частотой 340 Гц. Определите, на каком расстоянии от поверхности воды до края сосуда происходят заметные первое и второе усиления звука. Температуру воздуха принять равной 20 °С.

9.65. Определите возможные собственные частоты колебаний стержня длиной l, если закреплены: а) оба его конца; б) один конец.

9.66. Зачем полый корпус скрипки делают фигурным?