

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АРХИТЕКТУРНО СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

Кафедра физики

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ ПО ФИЗИКЕ
для студентов специальностей 2903, 2906, 2907, 2910**

Лабораторная работа № 11

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ЗВУКА В ВОЗДУХЕ
МЕТОДОМ СТОЯЧИХ ВОЛН**

Казань 2015

УДК 539.584

Составитель Закиров И.Н., Потапова Л. И.
Под редакцией В. В. Алексева, Л.И. Маклакова.

Методические указания к лабораторным работам по физике для студентов специальностей 060811, 060815, 240400, 290300, 290600, 290700, 290800, 291000, 550100 Лабораторная работа № 11. Определение скорости звука в воздухе методом стоячих волн. /Казанский государственный архитектурно-строительный университет. / Составители: Закиров И.Н., Потапова Л. И., (под редакцией В. В. Алексева, Л.И. Маклакова). Казань 2015 г.

В работе рассмотрены вопросы, связанные с распространением звуковых волн, а также возникновением стоячих волн. Дана краткая теория, описаны характеристики и свойства колебаний, звуковых и стоячих волн. Приведено описание установки на которой проводятся измерения скорости звука в воздухе методом стоячих волн.

Стр. 12., рис 4..

Рецензент: доцент кафедры электротехники и автоматики Казанского государственного архитектурно-строительного университета Ю. Н. Тахциди.

© Казанский государственный архитектурно-строительный университет, 2017 г.

© Казанский государственный архитектурно-строительный университет 2015 г.

КОЛЕБАНИЯ. ВОЛНЫ. УРАВНЕНИЕ ВОЛНЫ.

Волновые процессы любой природы тесно связаны с колебаниями. *Колебаниями* называются процессы, характеризуемые той или иной степенью повторяемости во времени физических величин, определяющих эти процессы. Примером являются, например, качание маятника часов, переменный электрический ток и т. д. При колебательном движении маятника изменяется координата его центра масс, в случае переменного тока колеблются напряжение и ток в цепи. Среди множества различных видов колебаний простейшими являются *гармонические колебания*, при которых колеблющаяся величина (например, смещение точки от положения равновесия) изменяется со временем по закону синуса или косинуса:

$$s(t) = A \cdot \sin(\omega t + \alpha) \quad \text{либо} \quad s(t) = A \cdot \cos(\omega t + \alpha) \quad (1)$$

Здесь s — мгновенное значение колеблющейся величины, A — амплитуда колебания, т.е. максимальное значение, которое принимает колеблющаяся величина, $(\omega t + \alpha)$ — фаза колебания, α — начальная фаза, ω — циклическая частота. Циклическая частота ω связана с периодом колебаний T соотношением

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

Периодом T называется время одного колебания. Величина ν , обратная периоду и определяющая число колебаний в секунду, называется частотой

$$\nu = \frac{1}{T} \quad (3)$$

Если в каком либо месте упругой среды возбудить колебания её частиц, то вследствие взаимодействий между частицами колебания будут распространяться в среде от частицы к частице со скоростью v . *Процесс распространения колебаний в пространстве называется волной. При распространении частицы среды не движутся вместе с волной, а колеблются около своих положений равновесия. Вместе с волной от частицы к частицы среды передаются лишь состояние колебательного движения и его энергия. Поэтому основным свойством всех волн, независимо от их природы, является*

перенос энергии без переноса вещества. Различают волны продольные и поперечные. В продольной волне колебания происходят вдоль направления распространения; в поперечной — перпендикулярно к направлению распространения. В жидких и газообразных средах возбуждаются лишь продольные механические волны (чередующиеся сжатие и растяжение среды). В твёрдых телах могут возникать как продольные, так и поперечные волны.

*Область пространства, внутри которой происходят колебания, называется **волновым полем**. Поверхность, отделяющую волновое поле от области, где колебаний ещё нет, называют **фронтом волны**. Все точки фронта волны колеблются в одинаковых фазах, поскольку колебания в них начинаются одновременно. Форма фронта волны может быть различной. Простейшими являются плоская и сферическая волны. У плоской волны фронт — плоскость, у сферической — сфера. Линии, вдоль которых происходит распространение волны, называются **лучами**.*

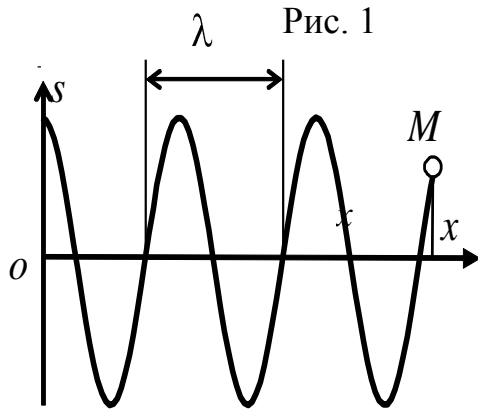


Рис. 1

В однородных изотропных средах лучи перпендикулярны к фронту волны.

Любой волновой процесс может быть описан уравнением, которое определяет зависимость некоторого возмущения s от его координат в пространстве и времени, то есть $s = s(x, y, z, t)$.

Рассмотрим волну, распространяющуюся вдоль оси Ox , в которой колебания совершаются с одной циклической частотой ω . Такая волна

называется плоской монохроматической волной. В этом случае возмущение зависит от координаты x и времени t :

$$s = s(x, t).$$

Пусть источник звука находится в начале координат ($x = 0$) и возбуждает колебания, которые происходят по закону

$$s(0, t) = A \cdot \cos \omega t .$$

Спустя некоторое время τ , колебание достигнет точки M , отстоящей от источника на расстоянии x . Если волна распространяется равномерно вдоль оси Ox , то это время определится как $\tau = \frac{x}{v}$. Всё сказанное можно описать

математически

$$s(x, t) = A \cdot \cos \omega(t - \tau) = A \cdot \cos \omega(t - \frac{x}{v})$$

Уравнение $s(x, t) = A \cdot \cos \omega(t - \frac{x}{v})$ называется уравнением плоской монохроматической волны.

Полученное уравнение с учётом того, что $\frac{\omega}{x} = \frac{2\pi}{xT} = \frac{2\pi}{\lambda}$ можно переписать в следующем виде:

$$s(x, t) = A \cdot \cos 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right). \quad (4)$$

Величина $\lambda = v \cdot T$ является важнейшей характеристикой волны и называется *длиной волны*. Длина волны равна расстоянию, на которое распространяется волна за один период колебания.

Зная, что $\omega = \frac{2\pi}{T}$ и введя волновое число по формуле $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ уравнение волны запишется также в виде

$$s(x, t) = A \cdot \cos (\omega t - kx). \quad (5)$$

ПРИРОДА ЗВУКОВЫХ ВОЛН. ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗВУКА

Звук представляет собой колебания воздуха или другой упругой среды, воспринимаемые нашими органами слуха. Так, колеблющаяся мембрана барабана создаёт попеременное сжатие и разрежение воздуха около неё, вследствие чего образуется продольная волна. Каждый участок воздуха совершает очень небольшие по размаху колебания, но в то же время волна может распространяться на достаточно большие расстояния. Звуковые колебания, воспринимаемые человеческим ухом, имеют частоты, лежащие в пределах от 20 до 20000 Гц. Колебания с частотами меньше 20 Гц называются *инфразвуковыми*, а больше 20 кГц — *ультразвуковыми*. Выделение диапазона 20 – 20000 Гц связано с физиологическими особенностями человеческого уха, способного воспринимать именно этот диапазон частот.

Скорость звука в газе зависит от его температуры T , молярной массы μ , и отношения теплоёмкостей при постоянном давлении и объёме $\gamma = C_p/C_v$. Можно показать, что $v = \sqrt{\frac{\gamma R T}{\mu}}$, где R — универсальная газовая постоянная. Значение скорости звука в воздухе, рассчитанное по этой формуле, хорошо согласуется с опытом. Экспериментальное значение скорости звука при температуре 0 °С равно 331 м/с.

Характеристики звука. Звук у нас ассоциируется обычно с его слуховым восприятием, с ощущениями, которые возникают в сознании человека. В связи с этим можно выделить три его основные характеристики: высоту, качество и громкость.

Высота и тембр звука. Физической величиной, характеризующей высоту звука, является *частота колебаний звуковой волны*. Чем меньше частота, тем ниже звук, а чем больше частота, тем выше звук. Звук, издаваемый при полёте жука, имеет частоту несколько десятков герц, тогда как писк комара — частоту, приближающуюся к 20000 Гц.

Когда мы слышим музыкальный звук, кроме высоты и громкости, мы воспринимаем его "качество". Звучание одной и той же ноты (а следовательно, звучание одинаковой частоты) на скрипке и трубе чётко различаются на слух. Для характеристики качества звука в музыке используют термин *тембр*, или тональная окраска звука. Качество звука можно связать с физически измеримыми величинами. Оно определяется наличием обертонов (удвоенных, утроенных и т.д. частот основной частоты), их числом и амплитудами. У различных музыкальных инструментов число обертонов и их амплитуды оказываются различными. Именно это придаёт звуку каждого инструмента определённый тембр.

Громкость звука. Громкость звука связана с физически измеряемой величиной — *интенсивностью волны*. Интенсивность определяется как энергия, переносимая волной за единицу времени через единичную площадку, расположенную перпендикулярно к направлению ее распространения. Как известно, она пропорциональна квадрату амплитуды волны. Интенсивность звуковых волн очень низка. Она изменяется от 10^{-12} (порог слышимости) до 10 Вт/м² (болевые ощущения).

Человеческое ухо воспринимает невероятно широкий диапазон интенсивностей, крайние его значения различаются в 10^{13} раз. Установлено, что величина, которую мы воспринимаем как громкость, не прямо пропорциональна интенсивности. *Уровень громкости L* вычисляется через интенсивность данного звука *I* по формуле:

$$L = \lg \frac{I}{I_0}, \quad (6)$$

где за I_0 принимается величина порога слышимости (т.е. $I_0 = 10^{-12}$ Вт/м²), причём используется десятичный логарифм. Уровень громкости измеряется в белах (Б). Однако удобнее оказалось использовать величину в 10 раз меньшую — децибел. Значение *L* в этом случае записывается:

$$L = 10 \cdot \lg \frac{I}{I_0}. \quad (7)$$

Стоячие волны.

В каждой точке среды (фиксированное значение x) совершается гармоническое колебание с периодом T . Для каждого момента времени (фиксированное t) получается распределение S вдоль x по гармоническому закону (мгновенная «фотография» волны, представленная на рис.1) с периодом вдоль Ox , равным λ .

Таким образом, волна имеет временной и пространственный периоды.

При наложении двух встречных - бегущей и отраженной - волн возникает стоячая волна. Пусть уравнения бегущей и отраженной волн, распространяющихся, соответственно, в направлениях x и $(-x)$, имеют вид:

$$S_1 = A \cdot \cos 2\pi \cdot \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) \quad (8)$$

$$S_2 = A \cdot \cos 2\pi \cdot \left(\frac{t}{T} + \frac{x}{\lambda} \right)$$

Для простоты амплитуды волн считаем равными. Результирующее смещение точки найдем как алгебраическую сумму

$$S = S_1 + S_2 = 2 \cdot A \cdot \cos 2\pi \frac{x}{\lambda} \cdot \cos 2\pi \frac{t}{T} \quad (9)$$

Это и есть уравнение стоячей волны. Из формулы (9) видно, что в стоячей волне колебания совершаются с тем же периодом T , а амплитуда колебаний $A_{ст}$ зависит от координаты x и равна:

$$A_{ст} = \left| 2 \cdot A \cdot \cos 2\pi \frac{x}{\lambda} \right| \quad (10)$$

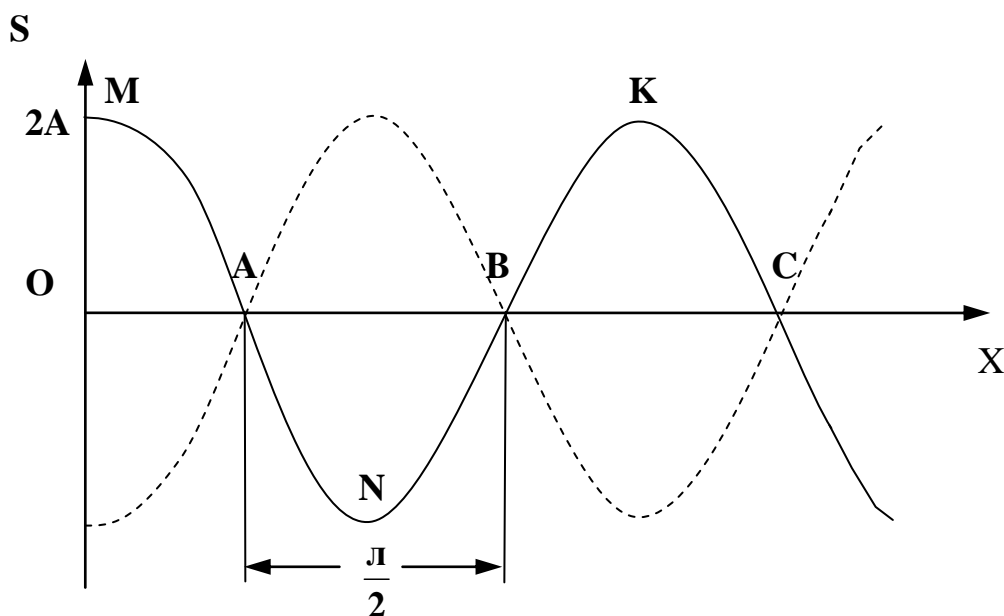


Рис. 2

На рис. 2 представлена « мгновенная фотография» смещений в стоячей волне в момент времени t (сплошная линия), когда отклонения от положения равновесия достигают максимального значения. На нем же представлено распределение смещений (пунктирная линия) в момент $t + \frac{T}{2}$, т.е. спустя половину периода колебаний. В этом случае фаза колебаний каждой точки изменяется на π , а знаки смещений S меняются на противоположные.

Для точек M, N, K , в которых выполняется условие $\left| \cos 2p \frac{x}{l} \right| = 1$, амплитуда колебаний максимальна и в соответствии с уравнением (10) равна $2A$. Эти точки называются пучностями. Амплитуда для точек, в которых выполняется условие

$$\cos 2p \frac{x}{l} = 0 \quad (11)$$

равна нулю. Эти точки называются узлами (рис. 2, точки A, B, C). Из тригонометрии известно, что косинус угла обращается в нуль, когда сам угол в радианах равен нечетному числу $\pi/2$ ($\pi/2, 3\pi/2, 5\pi/2$, и т.д.), т.е.

$$2p \cdot \frac{x}{l} = (2m + 1) \cdot \frac{\pi}{2}, \quad \text{где } m = 0, 1, 2, \quad (12)$$

Отсюда можно определить координаты узлов x :

$$x = (2m + 1) \cdot \frac{l}{4} \quad (13)$$

Из (13) найдем расстояние Δx между соседними узлами (m и $m + 1$)

$$\Delta x = x_{m+1} - x_m = \left[(m + 1) + 1 \right] \cdot \frac{l}{4} - (2m + 1) \cdot \frac{l}{4} = \frac{l}{2} \quad (14)$$

т.е. расстояние между соседними узлами (или пучностями) равно половине длины волны, $\frac{l}{2}$ (рис. 2).

Стоячие волны могут возникать при отражении звуковой волны от границы раздела сред. Существенно, что при отражении волны от более плотной среды фаза колебаний скачкообразно изменяется на противоположную, т.е. на 180° . Поэтому у границы раздела будет образовываться узел. Если отражение происходит от менее плотной среды, то на границе раздела будет пучность.

Если рассматривать бегущую волну, то в направлении ее распространения переносится энергия колебательного движения. В случае же стоячей волны *переноса энергии нет*, так как падающая и отраженная волны одинаковой амплитуды несут одинаковую энергию в противоположных направлениях. Поэтому полная энергия результирующей стоячей волны, заключенной между узловыми точками, остается постоянной. Целью данной работы является ознакомление с условиями возникновения и свойствами стоячих волн и определение скорости звука в воздухе.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Схема используемой установки приведена на рис. 3. Она состоит из звукового генератора ЗГ, укрепленного на щите, телефонной головки Т, служащей источником звука, стеклянной трубки T_p , в которой образуются стоячие волны, подвижного поршня П, микрофона М, используемого для приема звуковых колебаний, и осциллографа О.

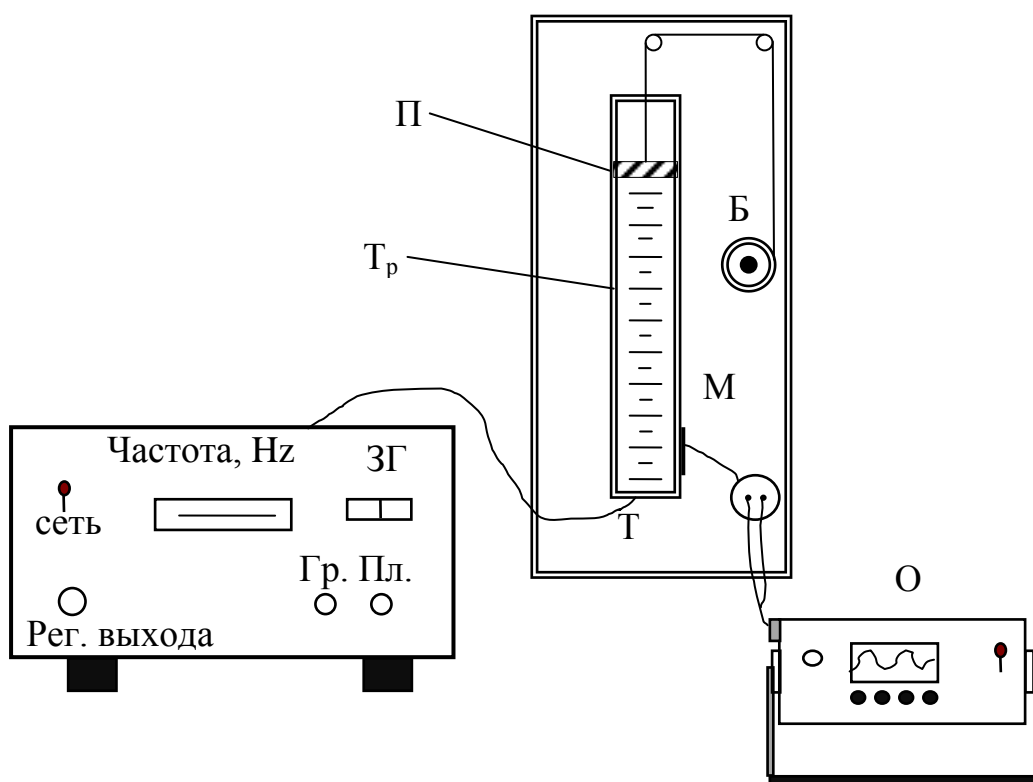


Рис. 3

При определенных условиях в трубке T_p возникает акустический резонанс, т.е. колебания столба воздуха в трубке достигают максимальной амплитуды.

Это имеет место, когда в нижней части трубки, где расположены телефон Т и микрофон М, будет пучность. Для этого необходимо, чтобы на длине x столба воздуха между телефоном и поршнем укладывалось нечетное число четвертей длин волн λ , т.е. выполнялось условие

$$x = (2m+1) \frac{\lambda}{4}, \quad \text{где } m = 0,1,2,3. \quad (15)$$

На рис. 4 представлено схематичное изображение стоячей волны для случая $m = 3$, когда $x = 7 \lambda/4$. При этом у поршня будет узел.

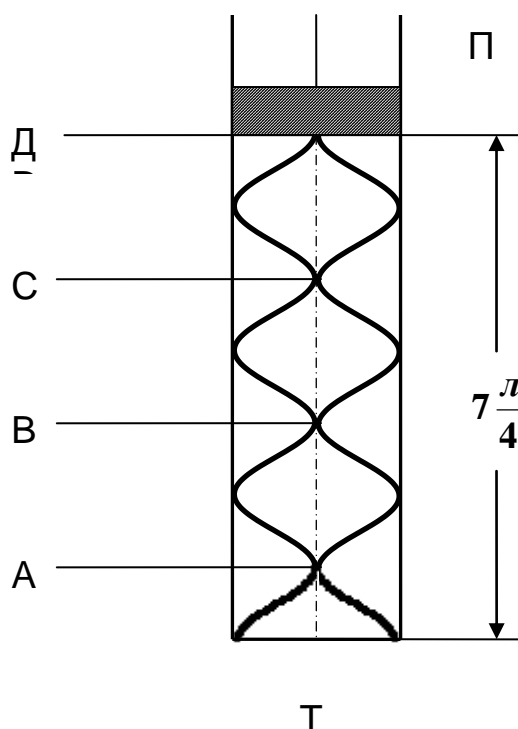


Рис. 4

Соответствующие положения поршня можно находить на слух, по максимуму звука при резонансе. В данной работе положения поршня (более точно) определяются по максимуму сигнала на экране осциллографа, подаваемого от микрофона М.

В работе находят расстояние Δx между двумя ближайшими положениями поршня (двумя соседними узлами стоячей волны), соответствующими максимуму сигнала на осциллографе. Из формулы (14) следует, что длина искомой звуковой волны

$$\lambda = 2\Delta x \quad (16)$$

Постепенно, отодвигая поршень от телефона, можно найти ряд положений поршня (рис. 4 точки А,В,С,Д и т.д.), когда в трубке будет усиление колебаний. Они соответствуют разным m по формуле (15). Скорость звука находится по формуле

$$v = \lambda \cdot \nu, \quad (17)$$

где ν - частота колебаний.

Подставляя (16) в (17), получаем рабочую формулу для определения скорости звука:

$$v = 2\Delta x \cdot \nu. \quad 8)$$

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Включить генератор ЗГ. Включить осциллограф, для чего перевести тумблер «ПИТАНИЕ» на передней панели вверх. Тумблеры на правой стороне осциллографа «СИНХР.» и «РАЗВЕР» установить в верхнее положение. При отсутствии луча на экране ручки «ФОКУС» и «УРОВЕНЬ» поставить в среднее положение, «ЯРКОСТЬ» и «СТАБ.» - в крайнее положение по часовой стрелке. При помощи ручек « \updownarrow » и « \leftrightarrow » найти и переместить изображение на середину экрана. Уменьшить яркость луча. Кабель, соединенный с гнездом « Y », расположенным на левой стороне осциллографа, включить другим концом в розетку, находящуюся на панели установки. Переключатель « Y », расположенный на передней панели, установить в положение « \sim ». Установить переключатель «V/ДЕЛ» так, чтобы исследуемый сигнал на экране занимал ~ 3 деления по вертикали. С помощью ручек «УРОВЕНЬ» И «СТАБ» установить устойчивое изображение. Вращением переключателя получить на экране несколько периодов сигнала.
2. Вращая барабанчик с нитью, опустить поршень в нижнее крайнее положение.
3. С помощью переключателя установить в ЗГ одну из фиксированных частот, указанных на приборе.
4. Наблюдая за картиной на экране осциллографа, медленно поднимают поршень. Как только сигнал на экране осциллографа достигнет максимума, зафиксировать положение поршня и по его нижней плоскости снять отсчет по шкале, что даст координату первого узла x_1 . Продолжая поднимать поршень, по максимуму сигнала на экране осциллографа определяют координаты второго, третьего, четвертого и т.д. узлов (соответственно x_2, x_3, x_4, \dots).

Из этих данных найти расстояние между первым и вторым, вторым и третьим и т.д. узлами:

$$\Delta x_1 = x_2 - x_1; \Delta x_2 = x_3 - x_2; \Delta x_3 = x_4 - x_3; \text{ и т. д.}$$

Вычислить среднее
$$\Delta x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta x_i$$

5. По формулам (16) и (18) вычислить длину волны и скорость звуковых волн (в системе СИ).
6. С помощью переключателя на ЗГ установить другую фиксированную частоту и повторить пункты 2 — 5.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое колебания?
2. Какие колебания называются гармоническими? Запишите уравнение гармонического колебания.
3. Что называется амплитудой, периодом и частотой колебаний?
4. Что называется волной? Напишите уравнение плоской волны.
5. Какие волны называются звуковыми? От каких физических величин зависит скорость звука в воздухе?
6. Характеристики звука. От чего зависят громкость, высота и тембр звука?
7. Когда возникают стоячие волны? Выведите уравнение стоячей волны. Охарактеризуйте стоячую волну.
8. При каком условии возникает резонанс столба воздуха в трубке?
9. Как связана скорость звука с длиной волны?