

СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЙ
УЧЕБНО-НАУЧНЫЙ ЦЕНТР –
факультет МГУ им. М.В.Ломоносова,
Школа имени А.Н. Колмогорова

Кафедра физики

ОБЩИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ПРАКТИКУМ

Лабораторная работа № 3.12

Экземпляр № _____

«Теория – хорошая вещь, но правильный эксперимент остается навсегда.»

П.Л. Капица

СПРАВОЧНЫЕ ДАННЫЕ

Приставки для образования десятичных кратных и дольных единиц

Кратные		Дольные	
Приставка, обозначение	множитель	Приставка, обозначение	множитель
пета, П	10^{15}	фемто, ф	10^{-15}
тера, Т	10^{12}	пико, п	10^{-12}
гига, Г	10^9	нано, н	10^{-9}
мега, М	10^6	микро, мк	10^{-6}
кило, к	10^3	милли, м	10^{-3}
гекто, г	10^2	сантиметры, с	10^{-2}
дека, да	10^1	деци, д	10^{-1}

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ПОСТОЯННЫЕ

Постоянная тяготения	$\gamma = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{кг}^2$
Постоянная Больцмана	$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$
Постоянная Планка	$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$
Число Авогадро	$N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$
Скорость света в вакууме	$c = 2,998 \cdot 10^8 \text{ м/с}$
Заряд электрона	$e = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
Отношение заряда электрона к массе покоя	$e/m_0 = 1,76 \cdot 10^{11} \text{ Кл/кг}$

**Специализированный учебно-научный центр –
Факультет МГУ имени М.В.Ломоносова,
Школа имени А.Н.Колмогорова
Кафедра физики**

Общий физический практикум

Лабораторная работа

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

Составитель И.В. Кузнецова

2012 г.

Лабораторная работа № 3.12

Определение скорости звука методом стоячих волн в трубе

Цель работы: измерение скорости звука в воздухе методом стоячих волн в трубе.

Приборы и оборудование: Труба – акустический резонатор, звуковой генератор (ЗГ), дулулучевой осциллограф, цифровой вольтметр, динамик и микрофон для выделения отклика акустической системы,

Теоретическая часть

1. Звуковые волны

Звук - это распространяющееся в виде волн возмущение газообразной, жидкой или твердой среды посредством колебательного движения частиц. *Звуковые* волны являются механическими и представляют собой распространение деформации среды в виде взаимосвязанных колебаний плотности ρ , давления P , смещения ξ частиц и скорости v их движения. Звуковые колебания воспринимаются специализированными органами слуха человека и животных. Для человека диапазон воспринимаемых частот лежит в интервале от 16 Гц до 20 кГц. Область физики, изучающая звуковые явления, называется *акустикой*.

Если колебания (смещения) частиц происходят вдоль направления распространения волны, то волна называется *продольной*. Продольные волны наблюдаются в твердых телах, жидкостях и газах.

Если частицы смещаются перпендикулярно направлению распространения волны, то это *поперечная волна*. Поперечные звуковые волны могут распространяться в различных средах, но в жидкостях и газах они очень быстро затухают, поэтому наблюдать поперечные волны легче всего в твердых телах.

2. Основные физические величины, характеризующие распространение звука

При распространении звуковой волны в воздухе в каждой точке пространства наблюдаются попеременно деформации сжатия и разрежения, что приводит к изменению давления в среде по сравнению с атмосферным (статическим) давлением. Переменная величина - разность между атмосферным давлением и давлением в данной точке среды называется *звуковым давлением* $P_{зв}$, которое иногда называют избыточным.

Если обозначить давление и плотность газа, находящегося в однородном состоянии при отсутствии в нем звуковой волны, соответственно, как $P_0 = const$ и $\rho_0 = const$, то при наличии волны давление и плотность в каждой точке газа (т.е. в физически малом объеме) будут определяться, как $P = P_0 + P_{зв}$ и $\rho = \rho_0 + \rho_{зв}$. Изменение давления и плотности здесь очень малы $P_{зв} \ll P_0$ и $\rho_{зв} \ll \rho_0$. В звуковой волне, создаваемой при обычном разговоре, избыточное давление составляет около миллионной доли атмосферного давления. Деформации сжатия соответствует положительное значение звукового давления, деформации разрежения - отрицательное. Звуковое давление является функцией

времени и координат $P = P_{зв}(x, t)$. Плотность связана с давлением и также является переменной величиной $\rho = \rho_{зв}(x, t)$. На рисунке (1) изображены колебания давления и плотности в звуковой волне. В каждой точке среды звуковое давление действует равномерно во все стороны, является скалярной величиной и представляет собой силу, действующую на единицу площади поверхности. В системе СИ его измеряют в ньютонах на квадратный метр (Н/м²), эта единица называется Паскаль (Па). В системах вещания и связи имеют дело со звуковым давлением, не превышающим значение в 100 Па.

Помимо звукового давления, величиной, характеризующей звуковую волну, является *смещение частиц* - это отклонение частиц среды от равновесного положения при прохождении этой волны. Штриховые линии визуализируют слои частиц, положения равновесия которых в плоской волне перпендикулярны оси x . Стрелками показано смещение ξ частиц при распространении волны в среде. Из рисунка видно, что при распространении продольной волны в среде, создаются чередующиеся сгущения и разрежения частиц, перемещающиеся в направлении распространения волны со скоростью c . В действительности, отдельные молекулы газа перемещаются хаотически, но расположенные в некотором объеме частицы в совокупности образуют области сжатия и разрежения среды.

Геометрическое место точек, до которых доходят колебания к произвольному моменту времени t , называется *волновым фронтом*. Геометрическое место точек,

колеблющихся одинаково, т. е. в одной фазе, называется *волновой поверхностью*. Фаза колебаний - физическая величина, определяющая при заданной амплитуде состояние колебательной системы в любой момент времени. Фаза выражается в угловых единицах радианах, градусах или в циклах (долях периода).

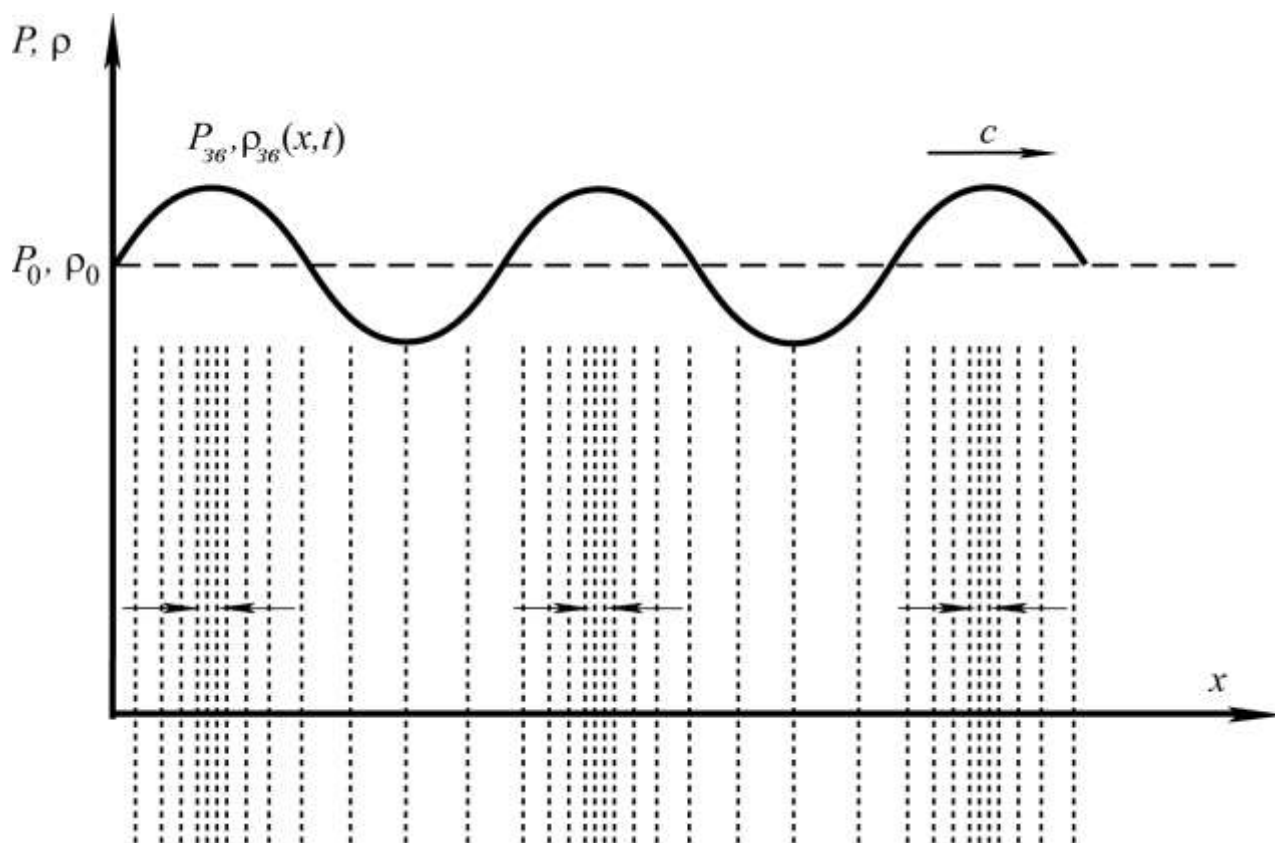


Рис 1. Колебания давления и плотности в гармонической звуковой волне связаны с образованием чередующихся областей разрежения и сгущения частиц

Волновые поверхности могут быть любой формы, в простейших случаях они имеют форму плоскости или сферы. Расстояние λ , на которое распространяется волна за время равное периоду колебаний частиц среды, называется длиной волны. Частицы, отстоящие друг от друга на λ , колеблются с разностью фаз равной 2π , то есть синфазно.

Очевидно, что $\lambda = cT$, где c - скорость волны, T - период колебаний. Величина, обратная периоду, называется частотой или линейной частотой $f = 1/T$. С учетом этого выражения, получаем соотношение

$$c = \lambda f. \quad (1)$$

Скорость звука, величина постоянная для данной среды и зависит от условий распространения.

Под скоростью звука в газах понимают скорость фронта волны – поверхности, проходящей через ближайšie частицы, движущиеся синфазно. Направление распространения звука в каждой точке фронта определяется нормалью к его поверхности.

3. Как измеряли скорость звука

Мысль измерить скорость звука впервые пришла английскому философу Фрэнсису Бэкону. (1561-1626 г.) По его совету этим экспериментом занялся французский ученый Марен Мерсенн (1586-1648 г.), Основным методом, которым пользовались исследователи, был метод, предложенный Галилеем (1564-1642 г.), заключающийся в измерении интервала времени между моментом светового восприятия выстрела и моментом прихода звука от выстрела к наблюдателю. В 1630 году Мерсенн провел наблюдение за выстрелом из мушкета, определяя это время по числу ударов пульса, и скорость определенная таким образом соответствовала значению 448м/с. Через пять лет, в 1635 году, другой ученый, П. Гассенди (1592-1655г.), по похожей методике попытался определить, есть ли разница в скорости

распространения звука от более звонкого ружейного выстрела и более глухого пушечного. Оказалось, что скорость звука от его частоты не зависит.

Спустя полвека Исаак Ньютон (1643-1727г.) вычислил скорость звука теоретически, исходя из упругих свойств воздуха и зависимости удельного объема газа от давления при постоянной температуре, выраженной законом Бойля-Мариотта.

Эта скорость оказалась чуть больше половины скорости определенной Мерсенном. Ньютон понял, что его формула некорректна после того, как сам экспериментально проверил результат. Он измерял время эха от хлопка в ладоши, стоя между двумя параллельными стенами, находившимися на расстоянии 200 м одна от другой, и получил скорость звука около 340 м/с. В 1738 году члены Парижской академии наук решили повторить опыт Мерсенна, выбрав для этого холм Монмартр (Холм мучеников), находившийся тогда в пригороде Парижа. Световые вспышки с возвышения видны с большего расстояния; после выстрела звуковая волна движется к наблюдателю дольше, и измерение скорости звука получается с меньшей погрешностью. При температуре 20° С была зафиксирована скорость звука 337,3 м/с, а при температуре 0° С скорость звука составляла 332 м/с. что отличается от измерений, полученных уже в наше время менее чем на 1% ($331,4 \pm 0,05$) м/с.

В 1816 году французскому математику и астроному П. С. Лапласу (1749-1827г.) удалось обнаружить, в чем была ошибка Ньютона. Выяснилось, что теоретический результат

Ньютона был неверен из-за предположения, что распространение звука происходит в изотермических условиях, т.е. при постоянной температуре. В действительности, т.к. теплопроводность воздуха мала, а расстояние между слоями сжатия и разрежения велико избыток тепла из области сжатия не успевает переходить в холодный слой разрежения. За время периода колебаний давления, выравнивания температур не происходит, т.е. такой процесс является адиабатическим. Связь между давлением и объемом газа в адиабатическом процессе определяется уравнением Пуассона:

$$PV^\gamma = const \quad (2)$$

где $\gamma = \frac{C_p}{C_v} = \frac{i+2}{i}$, где i – число степеней свободы молекул газа, C_p и C_v молярные теплоемкости газа при постоянном давлении и при постоянном объеме соответственно. Согласно уточненным представлениям Пьера Лапласа скорость звука в газе определяется соотношением

$$c = \sqrt{\gamma \frac{P_0}{\rho_0}} \quad (3)$$

Отметим, что среднеквадратичная скорость молекул воздуха близка к скорости звука.

4. Экспериментальное определение скорости звука методом стоячих волн в трубе

Скорость звука может быть определена экспериментально различными методами. В настоящей

работе используется измерение скорости звука в воздухе методом стоячих волн в трубе. Для объяснения сущности методики воспользуемся следующей математической моделью.

Уравнения волны

Математически распространение всех видов волн описывается *уравнением волны*.

Уравнением волны называется выражение, которое представляет как функцию координат (x, y, z) и времени t один из параметров, характеризующих волновое движение колеблющейся частицы. Под частицей понимается небольшая часть объема среды.

Для примера рассмотрим смещение, т.е. отклонение частицы от ее положения равновесия: $\xi = \xi(x, y, z; t)$

где (x, y, z) - координаты частицы в состоянии равновесия. Эта функция должна быть периодической как относительно времени t , т. к. описывает колебание частиц, так и относительно координат, т. к. точки отстоящие друг от друга на расстояние λ , колеблются одинаковым образом.

Опишем вид функции $\xi(x, y, z; t)$ в случае плоской волны, предполагая, что колебания носят гармонический характер, и ось x совпадает с направлением распространения волны. Тогда $\xi = \xi(x, t)$.

Пусть колебания точек лежащих в плоскости $x = 0$ имеет вид:

$$\xi(0, t) = \xi_0 \cos(\omega t + \varphi). \quad (4)$$

Найдем вид колебаний точек в плоскости, соответствующей значению $x = x_\tau$ через $\tau = x/c$ - время,

необходимое волне, чтоб пройти расстояние x_τ .

Колебания частиц в плоскости x_τ будут отставать на $\tau = x/c$ от колебаний частиц в плоскости $x = 0$, и будут иметь вид:

$$\xi(0,t) = \xi_0 \cos(\omega(t - x/c) + \varphi). \quad (5)$$

Величина ξ_0 представляет собой амплитуду волны, φ - начальная фаза волны определяется выбором начал отсчета x и t . Выражение в скобках $\omega(t - \frac{x}{c}) + \varphi$ называется фазой волны и определяет при заданной амплитуде состояние колебательной системы в любой момент времени. Зафиксируем какое-либо значение фазы, положив $\omega(t - x/c) + \varphi = const$. Это выражение определяет связь между временем t и той пространственной координатой x , в которой фаза имеет фиксированное значение. Вытекающее из него значение $\frac{dx}{dt}$ дает скорость, с которой перемещается данное значение фазы.

Продифференцировав выражение $\omega(t - x/c) + \varphi = const$ по времени и координате, получим $dt - \frac{1}{c} dx = 0$, откуда

$$\frac{dx}{dt} = c \quad (6)$$

Получили что, скорость распространения волны в уравнении (6) это скорость перемещения фазы, поэтому, ее называют фазовой скоростью. Волна (5) распространяется в

сторону увеличения x . Волна $\xi(x, t) = \xi_0 \cos(\omega(t + x/c) + \varphi)$ будет распространяться в сторону уменьшения x .

Уравнению плоской волны можно придать симметричный вид относительно x и t вводя величину $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, называемую волновым числом. Умножим на частоту f числитель и знаменатель, получим волновое число в виде $k = \frac{2\pi f}{\lambda f} = \frac{\omega}{c}$. Величина ω называется циклической частотой.

Таким образом, уравнение плоской бегущей волны с учетом выражения для волнового числа и направления распространения переписывается в виде:

$$\xi(x, t) = \xi_0 \cos(\omega t \mp kx + \varphi) \quad (7)$$

В этой формуле амплитуда колебаний не зависит от x .

Для плоской волны это наблюдается в том случае, если энергия волны не поглощается средой. В реальных физических процессах, как правило, интенсивность бегущей волны с удалением от источника уменьшается, наблюдается затухание. Кроме того при распространении волн в разных средах происходит отражение волн от различных преград, и границ между средами. При наложении бегущих и отраженных волн возникает взаимодействие их друг с другом.

Уравнение стоячей волны

Рассмотрим случай взаимодействия или интерференции волн при наложении двух встречных плоских волн с одинаковой амплитудой и частотой.

Возникающий в результате колебательный процесс называется *стоячей волной*.

Напишем уравнения двух плоских волн, распространяющихся вдоль оси x в противоположных направлениях:

$$\begin{aligned}\xi_1(x, t) &= \xi_0 \cos(\omega t - kx + \varphi_1), \\ \xi_2(x, t) &= \xi_0 \cos(\omega t + kx + \varphi_2).\end{aligned}\tag{8}$$

Сложив эти уравнения и преобразовав результат по теореме косинусов получим:

$$\xi = \xi_1 + \xi_2 = 2\xi_0 \cos\left(kx + \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2}\right) \cos\left(\omega t + \frac{\varphi_2 + \varphi_1}{2}\right).\tag{9}$$

Уравнение (9) – уравнение стоячей волны. Для упрощения выберем начало отсчета x так, чтобы разность $\varphi_2 - \varphi_1$ стала равной нулю, а начало отсчета t так, чтобы оказалась равна нулю сумма $\varphi_2 + \varphi_1$. Для анализа формулы (9), учитывая что $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, получим уравнение стоячей волны смещения в виде:

$$\xi = 2\xi_0 \cos\left(2\pi \frac{x}{\lambda}\right) \cos(\omega t).\tag{10}$$

Выражение $2\xi_0 \cos\left(2\pi \frac{x}{\lambda}\right)$ – амплитуда стоячей волны, которая зависит от x .

В точках, координаты которых удовлетворяют условию: $2\pi \frac{x}{\lambda} = \pm n\pi$, где $(n = 0, 1, 2, \dots)$, амплитуда колебаний достигает максимального значения $2\xi_0$. Эти точки называются *пучностями* волны и их координаты равны

$$x_{\text{пучн}} = \pm n \frac{\lambda}{2}. \quad (11)$$

В точках, координаты которых удовлетворяют условию $2\pi \frac{x}{\lambda} = \pm(n + \frac{\lambda}{2})\pi$, амплитуда колебаний $2\xi_0 \cos(2\pi \frac{x}{\lambda})$ обращается в нуль, такие точки называются *узлами* стоячей волны. Названия «узлы» и «пучности» внесены в науку французским ученым Жозефом Савером (1653-1716 г)

Множитель $2\xi_0 \cos(2\pi \frac{x}{\lambda})$ при переходе через нулевое значение меняет знак. Это означает, что фаза колебаний по разные стороны от узла различается на π - т.е колебания частиц происходят в противофазе, а между узлами частицы колеблются синфазно. Частицы среды, находящиеся в узлах не совершают колебаний, и их координаты:

$$x_{\text{узн}} = \pm(n + \frac{1}{2}) \frac{\lambda}{2} \text{ где } (n = 0, 1, 2, \dots) \quad (12)$$

Как узел, так и пучность представляют собой не одну точку, а плоскости, координаты x которых определяются формулами (11) и (12) соответственно.

Для нахождения скорости колебания частиц в стоячей волне продифференцируем уравнение (10) по времени:

$$v = \frac{\partial \xi}{\partial t} = -2\omega \xi_0 \cos(2\pi \frac{x}{\lambda}) \sin(\omega t) \quad (13)$$

Уравнение (13) описывает скорость колебания частиц среды в стоячей волне.

Стойчая волна в трубе

Звуковая волна в газах может быть суммой колебаний с множеством различных частот. Чтобы выделить среди этих колебаний монохроматическую волну с определенной частотой используется резонатор в виде трубы длины L , заполненной воздухом. Воздух, ограниченный объемом трубы является колебательной системой, состоящей из очень большого числа частиц. Любая колебательная система, выведенная из положения равновесия и предоставленная сама себе, совершает свободные колебания, называемые собственными или нормальными колебаниями. Частоты, на которых система совершает нормальные колебания, называются собственными частотами или нормальными модами.

В дискретных системах, состоящих из N связанных колеблющихся элементов (осцилляторов), набор частот, на которых совершаются собственные колебания равен N . В распределенных системах (струна, мембрана, резонатор) существует бесконечное множество собственных колебаний.

Если на торце трубы установить мембрану, совершающую гармонические колебания, в трубе возникает плоская монохроматическая бегущая волна. Дойдя до края трубы часть волны, отразится и пойдет в обратную сторону, а часть, испытав преломление, будет распространяться в открытое пространство вне трубы. Взаимодействие бегущей и отраженной волн порождает стоячую волну.

Если в качестве параметра, описывающего волну выбрать плотность, в общем случае получим уравнение

аналогичное стоячей волне смещения частиц:

$$\begin{aligned} \rho(x,t) &= \rho_{амн} \cos(\omega t - kx + \varphi_1) + \rho_{амн} \cos(\omega t + kx + \varphi_2) = \\ &= \rho_{амн} \cos(\omega t + \varphi) - \cos(kx + \phi) + \rho_{амн} \cos(\omega t + \varphi) + \cos(kx + \phi) = \\ &= 2\rho_{амн} \cos(kx + \phi) \cos(\omega t + \varphi), \end{aligned} \quad (14)$$

где $\varphi = (\varphi_1 + \varphi_2)/2$, $\phi = (\varphi_2 - \varphi_1)/2$. Множитель $2\rho_{амн} \cos(kx + \phi)$ является амплитудой стоячей волны плотности.

Рассмотрим эту волну в трубе длиной L с открытыми концами. На торцах трубы (т.е. в точках с координатами $x = 0$ и $x = L$) плотность не может изменяться скачком т. о. должны выполняться условия

$$\rho(0,t) = const \text{ и } \rho(L,t) = const, \text{ это означает}$$

на открытых торцах атмосферное давление, или

$$\rho_{зв}(0,t) = 0 \text{ и } \rho_{зв}(L,t) = 0.$$

Подставляя в них выражения для $\rho_{зв}$ в стоячей волне получаем

$$\begin{cases} \rho_{зв}(0,t) = 2\rho_{амн} \cos(\phi) \cos(\omega t + \varphi) = 0, \\ \rho_{зв}(L,t) = 2\rho_{амн} \cos(kL + \phi) \cos(\omega t + \varphi) = 0. \end{cases} \quad (15)$$

Так как эти условия должны выполняться в любой момент времени t , то получаем систему уравнений

$$\begin{cases} \cos(\phi) = 0, \\ \cos(kL + \phi) = 0. \end{cases} \quad (16)$$

Откуда следует

$$\begin{cases} \phi = \frac{\pi}{2} + \pi n, \\ kL + \phi = \frac{\pi}{2} + \pi(m + n), \end{cases} \quad (17)$$

(где n, m – целые числа). Отсюда получаем

$$kL = \pi m \text{ или } k = \pi m / L, \text{ или } \lambda = 2\pi / k = 2L / m.$$

Таким образом, если длина трубы L такова, что расстояние между открытыми торцами равно целому числу полуволен

$$L = m\lambda / 2, \tag{18}$$

где m – целое число, то в трубе может установиться такая стоячая волна.

На рис. 2 изображен ряд мгновенных положений стоячей волны плотности для последовательных моментов времени:

t_1, t_2, t_3, t_4, t_5 .

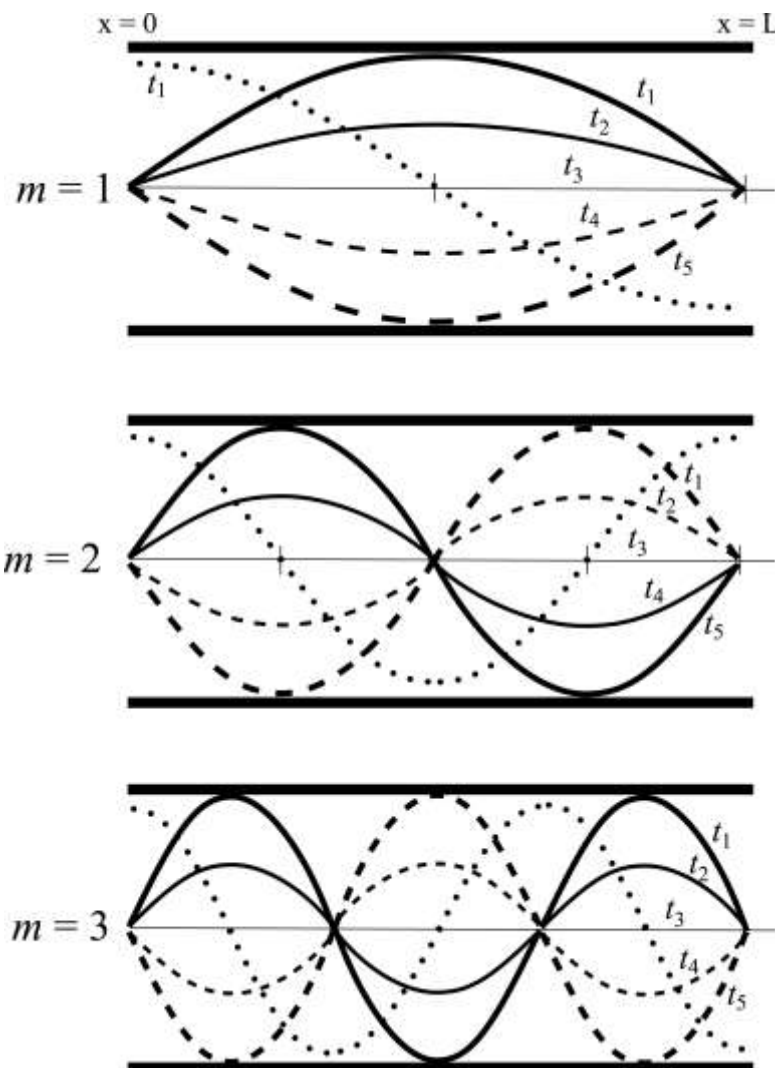


Рис 2. Изображение стоячих волн плотности и смещения в трубе с открытыми концами

Из формулы (18) видно, что а) при $m=1$ – на длине трубы укладывается половина волны; б) при $m=2$ – волна, в) при $m=3$ – полторы волны и т.д.

На концах трубы в точках с координатами $x=0$ и $x=L$ находятся узлы плотности воздуха, т.е. колебаний плотности нет и она равна равновесному значению ρ_0 . Точками во всех трех случаях а), б), в) - обозначена стоячая волна смещения, на концах трубы имеют место пучности смещения частиц.

Такую трубу, открытую с обеих сторон, можно считать *акустическим резонатором*, в котором в виде устойчивых стоячих волн существуют только те, которые удовлетворяют условию (18). Когда на длине трубы укладывается половина звуковой волны, что происходит при совпадении частоты внешнего воздействия динамика с основной частотой данной акустической системы, или кратное число половин, наблюдается увеличение акустического отклика системы в силу образования стоячих волн. Чисто стоячая волна, строго говоря, может существовать только при отсутствии потерь в среде и полном отражении волн от границы. Обычно, кроме стоячих волн, в среде присутствуют и бегущие волны, подводящие энергию к местам её поглощения или излучения. В нашем случае открытой трубы при существовании в ней стоячих волн создаются условия перераспределения энергии таким образом, что часть ее может эффективно излучаться во внешнее пространство.

Явление, при котором, наблюдается увеличение амплитуды колебаний системы при совпадении частоты внешнего воздействия с собственной частотой называется

резонансом. Определение скорости звука в настоящей работе основано на измерении разностей двух соседних частот, для которых имеет место усиление сигнала на приемнике звука. Согласно (1) и (18), соответствующая расчетная формула имеет вид

$$c = 2L\overline{\Delta f} \quad (19)$$

где c - фазовая скорость звука, L - длина трубы, $\overline{\Delta f}$ - среднее значение разностей соседних частот, на которых наблюдается резонансное усиление звука. Таким образом, определяя набор частот, на которых происходит усиление звуковых колебаний в некотором частотном диапазоне и, зная длину трубы, по формуле(19), можно определить скорость звука.

5. Описание экспериментальной установки:

Для проведения измерений используется установка, изображенная на рис 3.

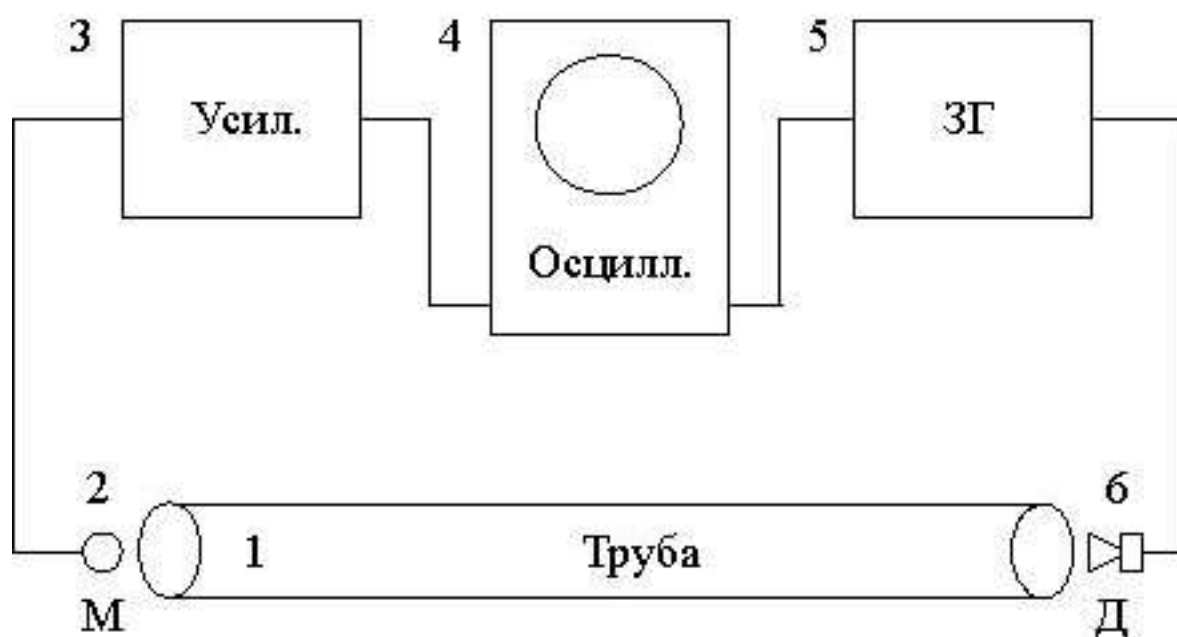


Рис. 3. Блок-схема экспериментальной установки для измерения скорости звука методом стоячих волн в трубе.

Открытая с обоих концов металлическая труба (1) используется как акустический резонатор. Приемником звука служит микрофон (2), размещенный у одного края трубы и соединенный через усилитель (3) с одним из входов двухлучевого осциллографа (4). Звуковой генератор (5), соединен с динамиком (6) и размещен у другого края трубы, таким образом, чтобы генерируемая в трубе волна имела форму фронта максимально близкую к плоской. Выход звукового генератора соединен со вторым каналом двухлучевого осциллографа(4).

При проведении измерений, на экране двухлучевого осциллографа можно наблюдать как сигнал с динамика, так и отклик, возникающий в воздушном столбе. Кроме того возможно наличие «ложных» максимумов, связанных с нелинейностью амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) аппаратуры - динамика и микрофона, используемых в данном эксперименте. Поэтому перед началом измерений резонансных частот в трубе, необходимо измерить АЧХ системы «микрофон-динамик».

6. Практическая часть. Порядок выполнения работы

Упражнение 1.

Снятие АЧХ системы «микрофон-динамик».

1. Включите звуковой генератор ЗГ, осциллограф, и усилитель, дайте им прогреться 2-3 минуты.
2. Подсоедините динамик к выходу звукового генератора,(ЗГ), микрофон ко входу усилителя, а

выход усилителя ко входу одного из каналов осциллографа.

3. Расположите динамик и микрофон так, чтобы между ними не было отражающих звук поверхностей
4. С помощью ручек «усиление» осциллографа и регулятором громкости ЗГ установите амплитуду сигнала отклика измерительной системы (примерно 2/3 шкалы)
5. Изменяя частоту генератора в пределах от 200 Гц до 2 кГц фиксируйте значение амплитуды сигнала и соответствующей частоты.
6. Занесите в таблицу максимальные значения амплитуды и соответствующие частоты, найденные в этом интервале.
7. Постройте график зависимости АЧХ измерительного тракта.

Упражнение 2.

Определение скорости звука

1. Установите динамик и микрофон напротив концов трубы на расстоянии не более 2-3 см.
2. Установите с помощью ручки «грубо» частоту на выходе звукового генератора около 200 Гц.
3. Убедитесь, что на экране двулучевого осциллографа наблюдается два гармонических сигнала, один из которых соответствует колебанию, задаваемому ЗГ, второй является осциллограммой отклика звуковой волны, возбуждаемой в трубе.
4. Плавно изменяя частоту на выходе звукового

генератора с помощью ручек «грубо» и «точно» добейтесь максимального увеличения амплитуды отклика на экране двулучевого осциллографа.

5. Зарегистрируйте наименьшее значение частоты ЗГ, на которой наблюдается увеличение амплитуды отклика акустической системы.
6. Плавно увеличивая частоту, повторите измерения в пределах 200-1400 Гц.
7. Полученные последовательно значения f_1, f_2, \dots, f_{1+j} , где f_1 соответствует наименьшей из зарегистрированных частот, а f_{1+j} – наибольшей в данном частотном диапазоне, занесите в заранее подготовленную таблицу.

8. Для всех пар соседних по возрастанию частот определите среднее значение разностей:

$$\overline{\Delta f} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta f_{1+i} - f_i .$$

9. Исключите из рассмотрения «ложные максимумы, связанные с нелинейностью АЧХ измерительного тракта, если таковые имеются.
10. Используя формулу (19), определите скорость звука в исследованном диапазоне частот. Длина трубы составляет $L = (133 \pm 1)$ см.
11. Определите наиболее вероятную случайную погрешность Δf в серии измерений полагая, что разброс значений подчиняется нормальному распределению Гаусса.

12. Считая, что звуковой генератор задает частоту с приборной погрешностью 2%, найдите общую погрешность эксперимента.
13. Сделайте выводы о проделанной работе

7. Вопросы для получения допуска к выполнению лабораторной работы.

1. Сформулируйте цель работы.
2. Объясните назначение каждого из приборов на вашем рабочем столе.
3. В каком частотном диапазоне вы будете проводить измерения?
4. Что может измениться в методике эксперимента, если увеличить длину трубы или уменьшить ее?
5. В какой форме вы будете представлять результаты измерений, и обрабатывать полученные вами данные?

8. Вопросы к защите результатов лабораторной работы

1. Что такое волна, и какие бывают волны?
2. Перечислите свойства бегущей, стоячей волны.
3. Что такое звуковая волна?
4. Выведите уравнения для скорости или смещения частиц при условиях а) закрытой с обеих сторон трубы; б) открытой с одной стороны; и в) открытой с обеих сторон трубы.
5. От чего зависит скорость звука в газах?
6. Используя формулу (3) получите зависимость скорости звука от температуры.
7. Что такое собственные или нормальные колебания?

8. Как связано возникновение стоячих волн с собственными колебаниями акустических устройств?
9. Какие виды резонаторов вы знаете?
10. Что такое амплитудно-частотная характеристика измерительного тракта?
11. С какими параметрами звуковой волны связана громкость звука?
12. Получите расчетную формулу (19).
13. Как можно видоизменить методику эксперимента?

Рекомендуемая литература

1. Мякишев Г.Я., Синяков А.З. Физика: Колебания и волны. 11 кл.: Учебник для углубленного изучения физики. - М.: Дрофа, 2002. – 288 с.
2. Иродов И.Е. Волновые процессы основные законы.- Москва-Санкт-Петербург: Физматлит Невский диалект лаборатория базовых знаний, 1999 – Глава I.
3. Иофе В.К., Корольков В.Г., Сапожков В.Г. Справочник по акустике. - Москва: Связь – 1979
4. Павленко Ю.Г. Физика. Учебное пособие - Москва: «Джангар», «Большая Медведица», 1998 – Глава III
5. Физический энциклопедический словарь. Гл.редактор А.М.Прохоров. – М.: «Советская энциклопедия», 1983, 928 с.
6. Меркулов В.В. журнал «Наука и жизнь» №5 2007 г. «В мире звуков. Как добывается истина...» (стр.104)

Плотность веществ

Твердые тела, $\times 10^3$ кг/м³

Алюминий 2,70	Свинец 11,3
Лед 0,92	Серебро 10,5
Медь 8,93	Сталь 7,88

Жидкости, $\times 10^3$ кг/м³
(при температуре 0° С)

Вода 1,0	Ртуть 13,6
Керосин 0,80	Спирт 0,79

Газы, кг/м³
(при нормальных условиях)

Азот 1,25	Воздух 1,29
Водород 0,09	Кислород 1,43

Тепловые свойства веществ

Твердые тела

Вещество	Удельная теплоемкость кДж/(кг·К)	Температура плавления °С	Удельная теплота плавления кДж/кг
Алюминий	0,88	660	380
Лед	2,1	0	330
Медь	0,38	1080	180
Олово	0,23	232	59
Сталь	0,46	1400	82

Жидкости

Вещество	Удельная теплоемкость кДж/(кг·К)	Температура кипения °С	Удельная теплота парообразования МДж/кг
Вода	4,2	100	2,3
Азот		- 196	0,20
Водород		- 253	0,45
Ртуть	0,12	357	0,29

Ускорение свободного падения для разных широт на уровне моря, м/с²

0° 9,780	60° 9,819
30° 9,793	90° 9,832

Скорость звука в некоторых средах при нормальных условиях, м/с

Воздух 342	Вода 1460
Водород 1300	Железо 5200

Диэлектрическая проницаемость некоторых веществ

Вода 81	Масло 2,5
Керосин 2,1	Стекло 7

Магнитная проницаемость некоторых веществ

	Парамагнетики
Азот 1,000013	Алюминий . . . 1,000023
Кислород . . . 1,000017	Платина 1,000253

	Диамагнетики
Вода 0,999991	Медь 0,999912
Водород 0,999937	Серебро 0,999981
Золото 0,999963	Цинк 0,999991

Цвета видимого спектра и соответствующие им диапазоны длин волн, нм

Красный 620 – 760	Голубой 480 – 500
Оранжевый . . . 590 – 620	Синий 450 – 480
Желтый 560 – 590	Фиолетовый . 380 – 450
Зеленый 500 – 560	