

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Физический факультет
Кафедра общей физики

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ПРАКТИКУМ

Ю. А. Орлов, А. Д. Косинов, А. Г. Костюрина, А. А. Кочеев

Работы 5.1, 5.2

ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ ЗВУКА В ВОЗДУХЕ

Учебно-методическое пособие

Новосибирск
2016

Ю. А. Орлов, А. Д. Косинов, А. Г. Костюрина, А. А. Кочеев .
Измерение скорости звука в воздухе (Измерительный практикум. Работы 5.1, 5.2): Учеб-метод. пособие/ Новосибир. Гос. ун-т. Новосибирск, 2016. 47 с.

Представлено новое описание лабораторных работ измерительного практикума кафедры общей физики НГУ. Пособие состоит из общего введения, дающего основные представления о звуке и звуковых волнах описаний двух лабораторных работ и приложения.

В первой работе студенты знакомятся с распространением звуковых волн в воздухе и измеряют скорость звука в воздухе методом бегущей волны, а также скорость воздушного потока. Приведены дополнительные задания по курсу «Основы информационных технологий».

Во второй работе студенты знакомятся с механизмом формирования стоячих волн и измеряют скорость звука в воздухе методом стоячей волны тремя способами.

Работы выполняются студентами 1-го курса физического и геолого-геофизического факультета.

Пособие может быть использовано при обучении студентов других естественнонаучных и технических факультетов.

Рецензент

Докт. физ-мат наук, Р. А. Хайрулин

Методическое пособие подготовлено в рамках реализации *Программы развития государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования НИУ-НГУ* на 2009 – 2018 годы.

© Новосибирский государственный университет, 2016

© Ю. А. Орлов, А. Д. Косинов,
А. Г. Костюрина, А. А. Кочеев
2016

Содержание

Введение	5
Представление о звуке.....	5
Звуковая волна и звуковые колебания.....	6
Рекомендуемая литература.....	10
Работа 5.1. Измерение скорости звука в воздухе методом бегущей волны	11
1. Постановка работы.....	11
1.1. Бегущие волны.....	11
1.2. Измерение разности фаз методом курсорного измерения временной задержки между двумя сигналами....	12
1.3. Измерение разности фаз методом фигур Лиссажу...	13
1.4. Измерение скорости звука методом бегущей волны.	15
1.5. Измерение скорости потока воздуха по сдвигу фазы бегущей волны.....	15
2. Подготовка к проведению измерений.....	17
2.1 Описание установки.....	17
2.2. Источник и приёмник звуковой волны	18
2.3. Знакомство с установкой.....	19
3. Выполнение измерений.....	21
<i>Задание 1.</i> Измерение зависимости амплитуды волны от расстояния до источника.....	21
<i>Задание 2.</i> Измерение скорости звука в воздухе.....	22
<i>Задание 3.</i> Измерение скорости потока воздуха.....	24
Содержание отчёта.....	27

Контрольные вопросы.....	27
Дополнительные задания по курсу “Основы информационных технологий”.....	28
Работа 5.2. Измерение скорости звука в воздухе методом стоячей волны.....	30
1. Свойства стоячих волн и их применение для определения скорости звука.....	30
1.1. Распространение звука в трубе. Стоячие волны.....	30
1.2. Определение скорости звука методом стоячей волны.....	33
2. Подготовка к проведению измерений.....	36
3. Задания.....	39
3.1. Определение частотного диапазона установки на соответствие реальных и теоретических свойств стоячих волн.....	39
3.2. Измерение скорости звука.....	40
3.3. Обработка результатов измерений и их анализ.....	42
Контрольные вопросы.....	43
Содержание отчёта.....	43
Рекомендуемая литература.....	43
Приложение.....	44

ВВЕДЕНИЕ

Представление о звуке

Звук – распространяющееся в виде волн колебательное движение частиц упругой среды: газообразной, жидкой или твердой. Термин «звук» употребляется также для обозначения ощущения, вызываемого действием звуковых волн на специальный орган чувств (орган слуха) человека и животных [1, 2].

Как и любой другой волновой процесс, звук характеризуется скоростью распространения, амплитудой и частотным диапазоном.

Динамический диапазон частот звука чрезвычайно широк: от очень низких (условно от нуля) до частот $10^9 - 10^{13}$ Гц. Область частот ниже 16 Гц называется *инфразвуковой*, 16 – 20 000 Гц – *звуковой*, $2 \cdot 10^4 - 10^9$ Гц – *ультразвуковой*, а $10^9 - 10^{13}$ Гц – *гиперзвуковой*. Порог слышимости уха человека $2 \cdot 10^{-5}$ Н/м², шумная улица – 0,2 Н/м², сильные удары грома – 20 Н/м², болевой порог – 63 Н/м².

При импульсном или периодическом механическом воздействии на упругую среду возникают распространяющиеся в ней колебания положения (смещения), скорости частиц и связанные с этим изменения плотности и давления относительно не возмущенного состояния. Скорость распространения колебаний в среде называется скоростью звуковой волны или просто скоростью звука C . Расстояние, которое проходит волна за один период колебания T , равно длине волны $\lambda = C T$.

Это позволяет определить скорость звука по частоте колебаний и найденной в эксперименте длине волны. Длину волны можно определять различными способами. В лабораторной работе 5.1 это предлагается сделать методом "бегущей волны", а в работе 5.2 – методом "стоячей волны".

Звуковая волна и звуковые колебания

Основные закономерности распространения упругих колебаний в средах рассмотрены в учебном пособии по курсу "Механика и теория относительности" [3] и более подробно в [4].

Прежде, чем перейти к рассмотрению распространения звука в газовой среде, сделаем несколько общих замечаний.

Термины "волна" и "колебания" часто используют как синонимы, поскольку они являются двумя аспектами одного и того же звукового процесса. В узком смысле слова термин "колебания" используют для описания изменения каких-либо характеристик "объекта" *во времени*. Например, во времени изменяется плотность или давление в выделенной области среды, по которой распространяется звуковая волна. Поэтому говорят, что в данной области среды имеют место колебания плотности или давления.

Термин "волна" характеризует процесс распространения колебаний *в пространстве*.

Введем некоторые определения. *Гармоническим* называется процесс, в котором некоторая физическая величина $A(t)$ изменяется во времени по закону

$$A(t) = A_0 \cos(2\pi ft + \varphi_0) = A_0 \cos(\omega t + \varphi_0), \quad (1)$$

где A_0 – амплитуда колебания, равная наибольшему абсолютному значению колеблющейся физической величины, f – частота ($1/f = T$ – период колебания), $\omega = 2\pi f$ – циклическая частота, φ_0 и $\varphi = (2\pi ft + \varphi_0)$ – начальная и полная фаза соответственно.

Гармоническое колебание плоской бесконечной мембраны в однородной среде приводит к возбуждению плоской монохроматической звуковой волны. Выражение для амплитуды волны, распространяющейся в положительном направлении оси X , записывается в виде:

$$A(x, t) = A_0 \cos(\omega t - kx) = A_0 \cos 2\pi \left(ft - \frac{x}{\lambda} \right), \quad (2)$$

где $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число.

Аналогично влево от мембраны распространяется плоская звуковая волна с амплитудой: $A(x, t) = A_0 \cos(\omega t + kx)$, отличающейся от выражения (2) только знаком перед "пространственным" слагаемым

(kx). Начальная фаза φ_0 для простоты опущена, то есть в момент времени $t = 0$ значение величины $A(x, t)$ в начале координат равно $A(0,0) = A_0$.

Для одной волны начальный момент времени и начало координат всегда можно выбрать таким образом, чтобы начальная фаза была равна нулю. Мы воспользовались этим, записав уравнение (2) без начальной фазы. Однако, если в среде одновременно существует несколько различных звуковых волн, то *разница фаз* между ними не зависит от выбора координат и начала отсчета времени, то есть является их важной объективной характеристикой. В этом случае опускать начальную фазу в одной из волн, не изменив соответственным образом фазы всех других волн, уже нельзя.

Из выражения (2) следует, что в любой *фиксированный* момент времени $t = t_0$ зависимость $A(x)$ подчиняется гармоническому закону. Действительно, при $t = t_0 = const$ величина $\varphi_0 = \omega t_0 = const$ играет роль *пространственной* "начальной фазы", а аргументом функции $A(t_0, x)$ в этом случае является пространственная координата x . То есть, получается выражение аналогичное (1):

$$A(t_0, x) = A_0 \cos(kx - \varphi_0).$$

Точно так же, как для уравнения (1) величина T являлась периодом (*временным*), так и величина λ является периодом *пространственным*. Пространственный период повторения фазы называется *длиной волны* и определяется из условия

$$k(x_2 - x_1) = k\lambda = 2\pi. \quad (3)$$

В качестве величины $A(t, x)$, описывающей звуковые волны в газовой среде, является *звуковое давление* (p) – отклонение давления от среднего значения, происходящее в среде под действием звуковой волны. Если среда характеризуется давлением P_0 , то полное давление с учетом гармонической звуковой волны будет определяться следующим выражением (см. рис. 1,б):

$$P(t, x) = P_0 + p(t, x) = P_0 + p_0 \cos(\omega t - kx).$$

Единица измерения звукового давления – *паскаль*: $1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2$; и внесистемная единица $1 \text{ атм} = 1,0137105 \text{ Па}$. При рассмотрении явлений распространения звуковых волн величина P_0 опускается.

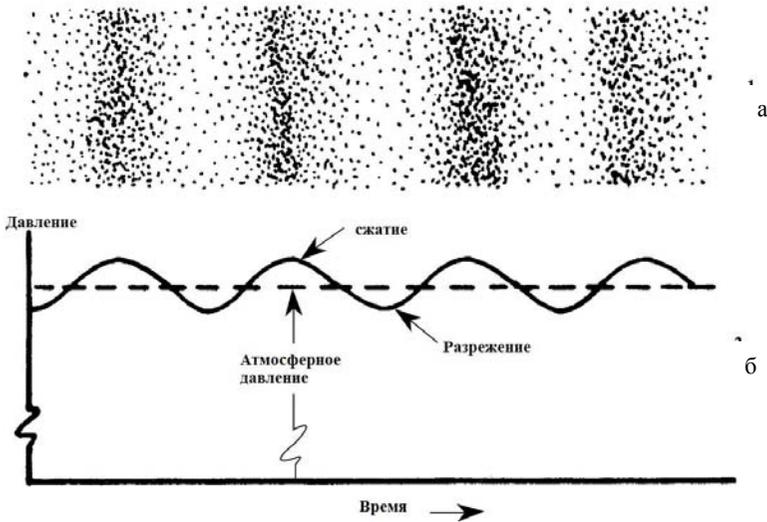


Рис. 1. Распространение во времени звуковой волны в газовой среде

Термин "*плоская волна*" определяет *форму волнового фронта* (или форму поверхности равной фазы). Если через какую-либо точку оси X провести перпендикулярную ей плоскость, то в любую точку этой плоскости плоская волна приходит одновременно и в одной фазе. Иначе говоря, на любой плоскости, перпендикулярной оси X , величина полной фазы в плоской волне будет одинакова и синхронно изменяется во времени. Для *сферической* волны волновым фронтом является поверхность сферы, а для *цилиндрической* – поверхность цилиндра. Поверхность равной фазы в бегущей волне перемещается вдоль направления её распространения со скоростью звука C .

Форму фронта легко представить, если считать, что источником плоской волны является бесконечная плоскость, перпендикулярная оси X , все точки которой колеблются синфазно (в одинаковой фазе и одинаковой амплитуде). Источником цилиндрической волны является боковая поверхность стержня бесконечной длины, радиус которого изменяется по синусоидальному закону; источником сферической волны является поверхность сферы с синусоидально изменяющимся радиусом.

Для *сферической* и *цилиндрической* волн, даже в отсутствии поглощения при достаточно больших удалениях от источника амплитуда убывает обратно пропорционально радиусу и корню квадратному из радиуса (r) соответственно:

$$A(r,t) = A_0 \frac{r_0}{r} \cos(\omega t - kr),$$

$$A(r,t) = A_0 \left(\frac{r_0}{r} \right)^{1/2} \cos(\omega t - kr),$$

здесь A_0 – амплитуда волны при $r = r_0$.

Произведение плотности среды на скорость волны ρC называют акустическим сопротивлением. При равенстве акустических сопротивлений двух сред звуковая волна проходит из одной среды в другую без отражения. В случае неодинаковых акустических сопротивлений коэффициент отражения η , равный отношению амплитуд отраженной и падающей волн, определяется выражением:

$$\eta = \frac{\rho_2 C_2 - \rho_1 C_1}{\rho_2 C_2 + \rho_1 C_1}. \text{ Для воздуха } \rho C \approx 400 \text{ кг/м}^2\text{сек, для стали } \rho C \approx$$

$5 \cdot 10^7 \text{ кг/м}^2\text{сек}$, поэтому коэффициент отражения на границе воздух – сталь практически равен единице ($\eta \approx 0,999992$).

Из-за диссипативных потерь энергии колебаний, например, обусловленных вязкостью и теплопроводностью среды, даже в плоской волне интенсивность звуковой волны уменьшается по закону $I = I_0 e^{-\alpha x}$, при этом коэффициент α сильно зависит от частоты звука. Как показывают эксперименты (в достаточно широком диапазоне звуковых частот) для газов коэффициент α пропорционален квадрату частоты. Поэтому низкочастотные звуки слышны на более далеких расстояниях. На величину α для воздуха сильно влияет ещё и его влажность, и, при определенных условиях, затухание волны может быть заметным на ультразвуковых частотах, применяемых в работе 5.1. В работе 5.2 используются звуковые частоты и диссипативные потери в воздухе невелики, но при распространении звука в трубе возникает затухание, связанное с трением воздуха о стенки

трубы и прохождением волны через неплотно закрытую щель в трубе.

Рекомендуемая литература

1. *Костюрина А. Г., Косинов А. Д.* Сборник лабораторных работ для студентов медицинского факультета и факультета естественных наук. Часть 3, Новосибирск, 2010.
2. Физическая энциклопедия. Т. 2, М., Изд-во «Советская энциклопедия» 1990.
3. Механика и теория относительности : учеб. пособие / В. И. Тельнов; НГУ, 2015.
4. *Горелик Г. С.* Колебания и волны. Введение в акустику, радиофизику и оптику. Изд-во М. Физматлит, 2008 г., 656 стр. Электронная версия. Физматлит, 2011 г. 667 стр.

Работа 5.1

ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ ЗВУКА В ВОЗДУХЕ МЕТОДОМ БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ

Цель работы: измерение зависимости амплитуды звуковой волны от расстояния до источника, определение скорости звука в воздухе методом бегущей волны и скорости потока воздуха.

Оборудование: установка для измерения скорости звука методом бегущей волны (рис. 1); генератор сигналов типа GFG 8255A, осциллограф типа TDS 1012, вентилятор.

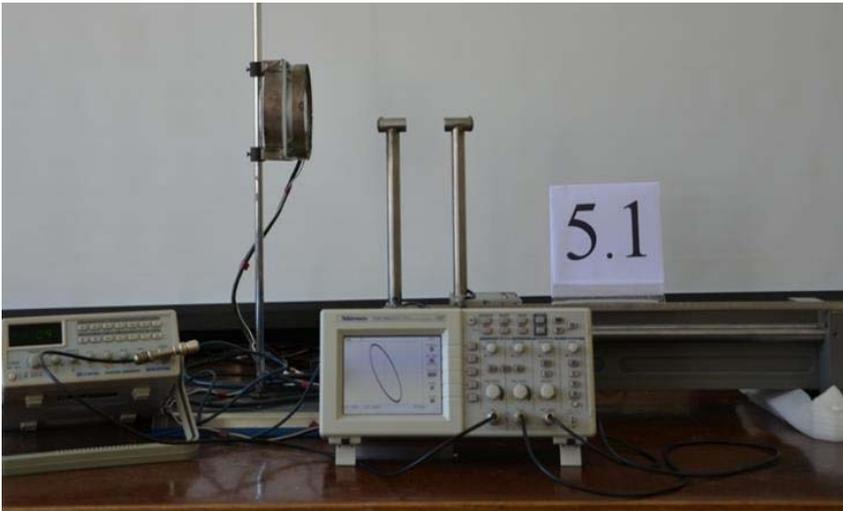


Рис.1. Фотография установки.

1. Постановка работы

1.1. Бегущие волны

Если излучающая поверхность источника звука совершает гармонические колебания $A_0 \cos(\omega t)$, то в упругой среде (в частности, в воздухе) распространяется бегущая звуковая волна [3, 4] (см. рис. 2 введения и [http://www.phys.nsu.ru/measuring/Иллюстрация к работе 5_1](http://www.phys.nsu.ru/measuring/Иллюстрация_к_работе_5_1)).

Как показано в ввводной части, если размер источника мал по сравнению с длиной волны, то на расстояниях много больше длины волны форма фронта волны близка к сферической и амплитуда убывает обратно пропорционально удалению от источника. Зависимость амплитуды сферической гармонической волны от расстояния можно записать в виде:

$$A(r, t) = A_0 \frac{r_0}{r} \cos(\omega t - kr), \quad (1)$$

где A_0 – амплитуда волны при некотором удалении r_0 ; r – расстояние от излучателя до точки наблюдения.

Из уравнения (1) следует, что для любого фиксированного момента времени разность фаз волны $\Delta\varphi$ в двух точках r_1 и r_2 зависит только от расстояния между ними $\Delta r = r_2 - r_1$:

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = kr_1 - kr_2 = 2\pi(r_2 - r_1)/\lambda.$$

Учитывая соотношение $C = \lambda f$, получим

$$C = 2\pi (r_2 - r_1) / \Delta\varphi. \quad (2)$$

Выражение (2) показывает, что по измеренному значению разности фаз в двух точках пространства можно определить скорость звука в среде, если известны расстояние между точками и частота звуковой волны.

Определение (или измерение) разности фаз двух каналным осциллографом можно провести двумя способами:

- по времени задержки между двумя гармоническими сигналами,
- методом фигур Лиссажу.

1.2. Определение разности фаз методом курсорного измерения временной задержки между двумя сигналами

Если на входы СН1 и СН2 осциллографа поступают два синусоидальных сигнала одинаковой частоты, но сдвинутые по фазе на $\Delta\varphi$, то при его работе в режиме УТ на экране наблюдаются два синусоидальных сигнала, сдвинутые относительно друг друга на некоторое

время Δt . Это время можно измерить, например, с помощью курсоров. Тогда при заданной частоте f разность фаз вычисляется по формуле: $\Delta\varphi = 2\pi\Delta t f$.

1.3. Измерение разности фаз методом фигур Лиссажу.

При включении осциллографа в режим XY, если на входы X и Y осциллографа поступают два синусоидальных сигнала одинаковой частоты, но сдвинутые по фазе на $\Delta\varphi$

$$U_x = A_x \sin(\omega t) \text{ и } U_y = A_y \sin(\omega t + \Delta\varphi),$$

то на экране осциллографа наблюдается эллипс. Обозначим координаты луча на экране осциллографа через x и y :

$$x = A_x \sin(\omega t) \text{ и } y = A_y \sin(\omega t + \Delta\varphi).$$

Исключив из этой системы уравнений ωt , получим связь между x и y :

$$\frac{x^2}{A_x^2} + \frac{y^2}{A_y^2} - \frac{2xy}{A_x A_y} \cos \Delta\varphi = \sin^2 \Delta\varphi. \quad (3)$$

Это уравнение эллипса, повернутого на некоторый угол относительно осей X и Y (см. рис. 2). Этот угол не связан с разностью фаз

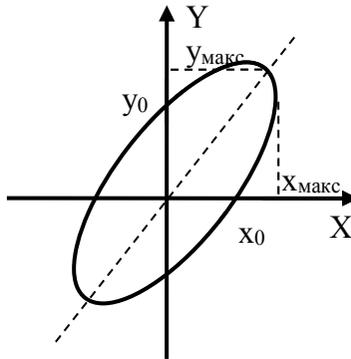


Рис. 2. Эллипс.

$\Delta\varphi$, а определяется только отношением амплитуд A_x и A_y . Луч на экране осциллографа пробегает эллипс по часовой стрелке при положительном значении фазы $\Delta\varphi$ и против часовой стрелки – при отрицательном значении. При заданных амплитудах сигналов параметры эллипса зависят от фазы $\Delta\varphi$. На рис. 3 приведены частные случаи фазы $\Delta\varphi$.

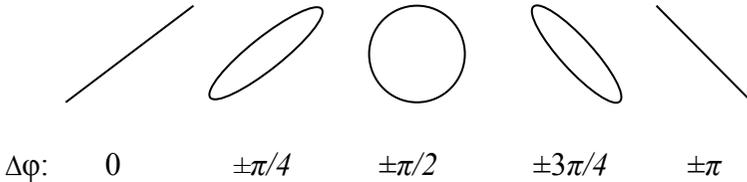


Рис. 3. Фигуры Лиссажу

Ясно что, наиболее точно разность фаз можно зафиксировать в тех случаях, когда эллипс вырождается в прямую, то есть при: $\Delta\varphi = n\pi$; $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

При $\Delta\varphi$ не кратной π значение фазы можно рассчитать по измененным параметрам эллипса. Перепишем уравнение эллипса (3) в виде:

$$\frac{y}{A_y} = \frac{x}{A_x} \cos \Delta\varphi \pm \sin \Delta\varphi \sqrt{1 - \frac{x^2}{A_x^2}}. \quad (4)$$

Для того чтобы подкоренное выражение не становилось отрицательным должно выполняться условие: $-A_x \leq x \leq A_x$. Откуда следует что, $x_{\max} = A_x$. Записав аналогичное выражение для x , как функции:

$$\frac{x}{A_x} = \frac{y}{A_y} \cos \Delta\varphi \pm \sin \Delta\varphi \sqrt{1 - \frac{y^2}{A_y^2}}, \quad (5)$$

также получим $y_{\max} = A_y$.

Обозначим значения координат в точках пересечения эллипса с осью X : $x|_{y=0} = x_0$ и с осью Y : $y|_{x=0} = y_0$ (см. рис.4). В этих точках первые слагаемые в выражениях (4) и (5) обращаются в ноль, а подкоренные выражения в единицу. Тогда эти выражения можно переписать в

виде: $\sin\Delta\varphi = \pm y_0/A_y = \pm y_0/y_{\max}$ и $\sin\Delta\varphi = \pm x_0/A_x = \pm x_0/x_{\max}$. Отсюда получаем искомые выражения для разности фаз:

$$\Delta\varphi = \pm \arcsin\left(\frac{y_0}{y_{\max}}\right) \quad (6a)$$

$$\Delta\varphi = \pm \arcsin\left(\frac{x_0}{x_{\max}}\right) \quad (6б)$$

1.4. Измерение скорости звука методом бегущей волны

Пусть на входы X и Y осциллографа подаются сигналы с источника и приемника звука соответственно. Сдвиг фаз (форма эллипса) будет зависеть от расстояния между источником и приемником звука. Перепишем условия вырождения эллипса в прямые ($\Delta\varphi = n\pi$) через длину волны, используя соотношение: $k = 2\pi/\lambda$:

$$r = 2n\lambda/2;$$

$$r = (2n + 1)\lambda/2.$$

Таким образом, можно сформулировать следующие условия вырождения эллипса в наклонные прямые:

1) если расстояние между источником и точкой наблюдения r кратно длине волны, то наклонная прямая располагается в первом и третьем квадрантах и имеет положительный угол наклона к оси X , $\Delta\varphi=0$ (см. рис. 3);

2) если это расстояние кратно нечетному числу полуволн, то прямая располагается во втором и четвертом квадранте и имеет отрицательный угол наклона, $\Delta\varphi = \pm\pi$, (см. рис. 3).

При монотонном изменении расстояния между источником и приемником звука эллипс при каждом изменении расстояния на $\Delta r = \lambda/2$ вырождается в прямую линию. Измерив Δr при фиксированной частоте, можно по формуле (2) определить скорость звука.

1.4. Измерение скорости потока воздуха по сдвигу фазы бегущей волны.

При фиксированном положении приемника и источника скорость потока воздуха (составляющую по линии источник–приемник) можно определить по разности фаз звуковых волн в движущемся и

стоящем воздухе. Поток воздуха (ветер) создается с помощью вентилятора. Скорость звука вдоль направления движения воздуха увеличивается и составляет $C+v$, где v – скорость ветра. Волновое число в этом случае равно: $k_1 = 2\pi f / (C+v)$. Вычислим разность набега фаз для звуковых волн в воздухе без ветра и с ветром:

$$\Delta\varphi = kr - k_1 r = 2\pi f r / C - 2\pi f r / (C+v). \quad (7)$$

Создаваемая вентилятором скорость ветра значительно меньше скорости звука ($v \ll C$), поэтому можно применить приближенное соотношение: $1/(C+v) \approx 1/C - v/C^2$. Тогда выражение (7) для разности набега фаз можно записать в виде:

$$\Delta\varphi = 2\pi f r v / C^2. \quad (8)$$

Отсюда получаем значение скорости ветра:

$$v = \Delta\varphi C^2 / 2\pi f r. \quad (9)$$

Для определения фазы звуковой волны для некоторого произвольного удаления (r_0) необходимо, передвигая приемник от точки $r=0$ до точки $r=r_0$, просуммировать все изменения фазы кратные 2π и прибавить фазу, измеренную в конечной точке $r=r_0$. Это надо сделать при выключенном и включенном вентиляторе. Разность этих фаз является искомой величиной $\Delta\varphi$ в выражениях (7)-(9) для значения $r=r_0$ и эта величина не ограничена диапазоном 2π . При предположении, что разность фаз мала (при заданных параметрах установки она значительно меньше π) методику измерения можно упростить. Для этого необходимо при выключенном вентиляторе поместить приемник на таком удалении от источника, при котором фаза кратна 2π . После включения вентилятора относительно этого значения появится дополнительный сдвиг фаз. Измерение этого значения сдвига фаз методом пункта 1.2 или 1.3 дает искомую величину $\Delta\varphi$ и позволяет вычислить скорости ветра (9).

2. Подготовка к проведению измерений

2.1. Описание установки

Схема установки для измерения скорости звука методом бегущей волны представлена на рис. 4.

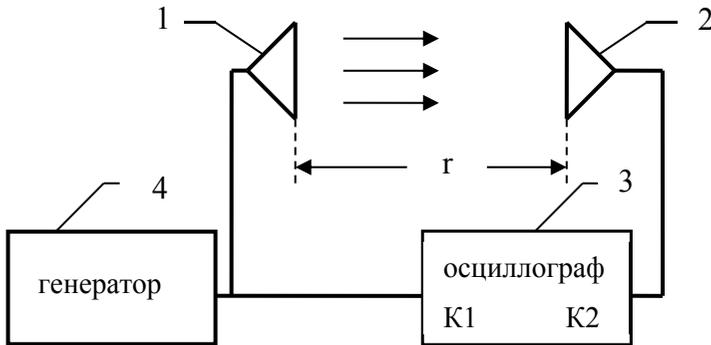


Рис. 4. Установка для измерения скорости звука:

1 – излучатель, 2 – приемник (микрофон), 3 – двухканальный осциллограф, 4 – генератор.

Гармонический сигнал с генератора (4) подаётся на излучатель (1) и первый канал (K1) осциллографа (3). Рабочая частота генератора около 40 кГц. Под действием переменного напряжения излучатель генерирует звуковую волну той же частоты. Звуковая волна проходит расстояние r и регистрируется приёмником звука (2), который преобразует её в переменное напряжение, подаваемое на вход второго канала (K2) осциллографа.

Устройство перемещения позволяет изменять расстояние r между приемником и источником в широком диапазоне (от нескольких единиц до десятков длин волн) и снабжено измерительной линейкой с дополнительной шкалой – нониусом. Измерительное устройство позволяет измерять перемещение Δr с точностью 0,025 мм. Порядок измерения расстояний измерительной линейкой таков же, как и при измерении штангенциркулем, но имеет свои особенности и состоит из трех шагов. По основной шкале (линейка 1 на рис. 5) отсчитывается целое число мм до начала шкалы линейки 2 (нулевой риски нониуса) – обозначим это значение n . Если нулевая риска нониуса располо-

жена до середины миллиметровых рисок основной шкалы, то запишем $N = n$, а если за серединой, то добавляем полмиллиметра $N = n+0.5$. Далее внимательно просматривается шкала нониуса и находится такая риска, которая визуально совпадает с некоторой риской на основной шкале. Отсчитываем количество делений на шкале нониуса до этой риски, обозначим это число m . Теперь складываем полученные числа с учетом цены деления нониуса равного 0.025 и получаем значение расстояния в мм: $r = (N+0.025 \cdot m)$ мм.

На рис. 4 приведен пример измерения: здесь: $n = 97$ ($N = 97$), $m=2$. Результат измерения: $r = (97+0.025 \cdot 2)$ мм = $97,05$ мм. Погрешность измерения ($0.025/2$ мм) после округления составляет 0.01 мм.

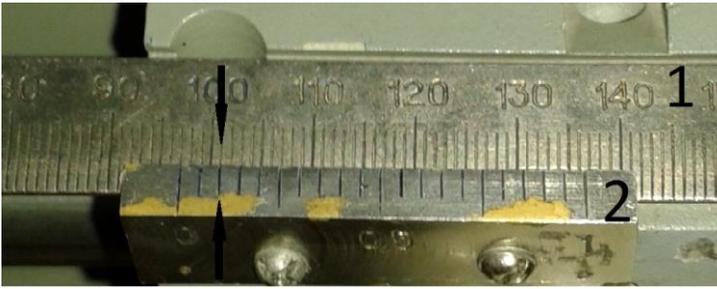


Рис. 5 Измерительная линейка: 1 – основная шкала и 2 - шкала-нониус; стрелками показаны совпадающие риски; расстояние равно $97,05$ мм.

2.2. Источник и приемник звуковой волны

Источник и приемник звуковой волны одинаковы по конструкции и параметрам (рис. 6). Они представляют собой цилиндрические пластинки (1) из пьезоэлектрического материала с укрепленным на излучающей (приемной) поверхности небольшим диффузором (2).

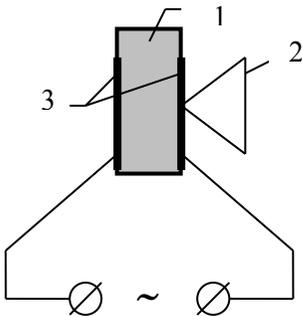


Рис. 6. Источник (приемник) звука: 1–пьезоэлемент, 2 – диффузор, 3– электроды.

На торцевые поверхности пластинок нанесены серебряные электроды (3). Если к электродам подведено переменное напряжение, то в пьезоэлектрике (1) возникают упругие механические колебания с частотой подведенного напряжения и с амплитудой, пропорциональной амплитуде напряжения.

Эти механические колебания передаются на диффузор и создают в окружающем пространстве звуковые волны. И наоборот, если подобная пластина испытывает механические воздействия (в частности, воздействие волны звукового давления), то на её обкладках возникает электрическое напряжение той же частоты с амплитудой, пропорциональной амплитуде звукового давления.

2.3. Знакомство с установкой

Соберите схему, изображенную на рис. 4. Установите приемник звука на расстоянии примерно 15 см от излучателя.

Настройка генератора

Включите генератор и установите следующие режимы работы:

1. генерации синусоидального сигнала – нажатием кнопки “ \sim ”;
2. частоту генерации 40 кГц, для чего нажмите кнопку множителя частоты 10 к, что соответствует умножению 10000 раз и ручкой плавного изменения частоты **FREQUENCY** (в положении **SWEEOFF**) установите частоту приблизительно 40 кГц.
3. максимальное выходное напряжение – ручку **AMPL** в положение максимума (max).

Настройка осциллографа

Осциллограф отображает графики напряжения по времени и позволяет выполнять различные измерения отображаемого сигнала. При выполнении измерений можно использовать *координатную сетку*, *курсоры* или результаты *автоматических измерений*.

Методом координатной сетки можно быстро выполнить *визуальную оценку* параметров сигнала (напряжения или времени). Для этого необходимо количество делений координатной сетки сигнала умножить на коэффициент соответствующего масштабирования (напряжения **В/дел** или времени **сек/дел**). Этот метод в данной работе используется при выполнении Задания 2 и 3.

Курсорный метод заключается в перемещении курсоров (которые всегда отображаются парами) и считывания значений, соответствующих их местоположению. Имеются два типа курсоров: курсоры

напряжения и курсоры времени. Для использования курсоров необходимо активизировать кнопку **CURSOR**. Курсорный метод можно использовать при выполнении Заданий 1 и 3.

При автоматических измерениях **MEASURE** все необходимые вычисления производятся осциллографом автоматически. Результаты автоматических измерений отображаются в полях экранных сообщений. Поскольку для измерений используются данные в точках дискретизации сигнала, то точность этого метода выше, чем при использовании координатной сетки или курсоров.

При измерении периодических сигналов, как правило, используется *автоматическая настройка* параметров – кнопка **AUTOSET**.

В этом режиме производится автоматическая настройка вертикального и горизонтального масштаба отображения, а также параметров синхронизации. В режиме автоматической настройки параметров можно использовать пять типов измерений с одновременным отображением результатов четырех: **Freq** (частота), **Period** (период), **Mean** (среднее значение), **Pk-Pk** (пиковая амплитуда), **Cyc RMS** (среднеквадратическое значение), **None** (отсутствует) – измерения не выполняются.

Метод автоматических измерений можно использовать при выполнении Заданий 1 и 3.

3. Выполнение измерений

Задание 1. Измерение зависимости амплитуды волны от расстояния до источника

1. Установите на генераторе частоту, соответствующую резонансной частоте источника и приемника. Для этого плавно изменяя частоту генератора в диапазоне от 39 до 41 кГц (ручкой “FREQUENCY” на генераторе) добейтесь максимальной амплитуды сигнала с приемника. Запишите значение полученной частоты. Далее все измерения проводите на этой частоте.

2. Снимите зависимость амплитуды сигнала приемника от расстояния r :

а) в ближней зоне источника в диапазоне расстояний от 1 см до 4 см, с шагом 0,5 мм.

б) в дальней зоне, от 5 см до 30 см, с шагом 1 см.

(Все экспериментальные данные занесите в таблицы).

Измерение амплитуды предлагается провести одним из двух способов: или автоматическом режиме, или курсорами.

При проведении измерений в *автоматическом* режиме выполните следующие действия.

- Нажмите кнопку **MEASURE** (Измерение), чтобы отобразить **Measure Menu** (Меню измерений).
- Активизируйте верхнюю функциональную кнопку, при этом отобразится **Measure 1** (Меню измерений 1).
- Нажмите функциональную кнопку **TYPE** (Тип) и выберите тип проводимых Вами измерений: или **Pk-Pk** (пиковая амплитуда), или **Сус RMS** (среднеквадратическое значение).

Для гармонической формы сигнала эффективное значение равно амплитуде, делённой на корень из двух.

Примечание. Поскольку для выполнения задания этого пункта сигнал с генератора, подаваемый на первый канал осциллографа, не нужен, то его можно отключить дважды нажав кнопку **MENU CH1**.

Измерение параметров сигналов с *использованием курсоров* проводится вручную, для чего:

- Нажмите кнопку **CURSOR** (Курсор) в меню (**MENU**), чтобы отобразить **Cursor Menu** (меню курсора). Далее при измерении времени активизируйте кнопку **Type – Time**, при измерении напряжения – **Type – Voltage**.
- Регуляторами **CURSOR 1** и **CURSOR 2** подведите курсоры в соответствующие положения, и в окне **Delta** отобразится измеренная величина времени или напряжения соответственно.

Точность измерения амплитуды зависит от размера сигнала по вертикали. При удалении от источника амплитуда сигнала уменьшается (1) и необходимо корректировать коэффициент усиления сигнала по вертикали, для этого ручку «Вольт/дел.» (**VOLTS/DIV**) второго канала установите так, чтобы размер сигнала по вертикали составлял не менее чем пол экрана.

3. Используя полученные данные, постройте график зависимости амплитуды от расстояния $A(r)$:

- а) в ближней зоне,
- б) в дальней зоне.

(Графики можно построить, используя приложение Microsoft Excel).

Проведите анализ формы графиков.

4. Для проверки закона (1) зависимости амплитуды волны от расстояния к таблицам данных добавьте ещё по столбцу, в которые вставьте произведения амплитуд на расстояния и постройте графики зависимости этого произведения от расстояния в ближней и дальней зоне

Проанализируйте полученные экспериментальные данные.

Задание 2. Измерение скорости звука в воздухе

1. Нажмите кнопку **AUTOSET**, при этом активизируются оба канала CH1 и CH2. Далее переключите осциллограф в режим развертки сигналом от звукового генератора (**XY**). При таком режиме на экране должен появиться эллипс. Для этого нажмите кнопку экран (**DISPLAY**), расположенную в Меню (**MENUS**) верхней части панели управления. В правой части экрана появится меню этого режима

с общим заголовком **DISPLAY** и с вертикально расположенными пунктами. Установите параметры трех верхних пунктов в режим:

Type	Persist	Format
Dots	Off	XY
Режим вывода на экран	Хранение данных на экране	Режим работы развертки
Точками	Выключен	Входом К1

Ручками “Вольт/дел”(VOLTS/DIV) первого и второго каналов установите чувствительность каналов так, чтобы эллипс занимал не менее чем пол экрана.

Изменяя расстояние r между источником и приемником в пределах от 5 до 30 см, зафиксируйте все точки r_k , при которых эллипс вырождается в прямую.

2. На удалении около 10 см от излучателя установите приёмник так, чтобы эллипс превратился в прямую. По измерительной линейке определите это расстояние (r_1) и запишите в таблицу. Так же запишите частоту на генераторе (f_1).

Отодвиньте приёмник от данного положения в сторону удаления от источника так, чтобы эллипс на экране осциллографа выродился в прямую 40 раз. Это соответствует изменению расстояния на 20 длин волн. Запишите это расстояние (r_2) и значение частоты (f_2). Вычислите длину волны по формуле: $\lambda = (r_2 - r_1)/20$.

3. Используя полученное значение длины волны по формуле (2) рассчитайте скорость звука C и погрешность ΔC :

Погрешность расчётного значения скорости вычисляется по следующей формуле [3, 4]:

$$\Delta C = 2\Delta r f / 20 + \Delta f (r_2 - r_1) / 20, \quad (10a)$$

где Δr – погрешность измерительной линейки и Δf – погрешность частоты генератора. Прежде чем вычислять погрешность по этой формуле оцените вклад каждого из слагаемых. Это легко сделать, если (10a) разделить на C и получить выражение для относительной погрешности: $\frac{\Delta C}{C} = \frac{2\Delta r}{r_2 - r_1} + \frac{\Delta f}{f}$. Погрешность Δf определяется по пас-

портным данным генератора. Для генератора GFG 8255A погрешность частоты определяется точностью её определения по шкале прибора (половина младшего разряда) и его стабильностью, равной 10^{-5} ,

что в сумме даёт относительную погрешность около $2 \cdot 10^{-5}$. Рассчитайте относительное изменение частоты по двум измеренным частотам (f_1 и f_2) и сравните её с погрешностью генератора. В качестве относительной погрешности надо взять максимальное значение из этих двух величин. Результат запишите в виде:

$$C \pm \Delta C. \quad (106)$$

Излучатель и приёмник имеют остро резонансную частотную характеристику амплитуды излучаемой и принимаемой звуковой волны. В области резонанса происходит не только резкое изменение амплитуды, но и резкое изменение фазы сигнала. Если генератор работает не стабильно, то изменение частоты приводит к ещё одной погрешности, связанной с изменением фазы излучаемой звуковой волны и с изменением фазы приемником при преобразовании в электрические напряжение вблизи резонанса. Изменение фазы приводит к изменению расстояний, при которых эллипс вырождается в прямые. Существуют и другие факторы, приводящие к погрешности измерения скорости звука и которые можно оценить следующим способом.

Переместите приёмник в обратную сторону на 20 длин волн вблизи исходной точки (r_1) так, чтобы на осциллографе эллипс выродился в прямую и определите координату, которую обозначим r_1^* . Вычислите разность $\delta r = |r_1^* - r_1|$. Если полученная величина превышает удвоенную погрешность измерительной линейки, то в качестве погрешности измерения расстояния надо взять δr .

Сравните полученный результат с табличным значением скорости звука в воздухе с учетом температуры в помещении. Используйте зависимость скорости звука от температуры для воздуха в системе СИ: $C(T) = 20,1 \sqrt{T}$, где T – температура в К [5].

Задание 3. Измерение скорости потока воздуха

Измерение скорости потока воздуха основано на измерении разности фаз звуковых волн, проходящих от источника до приемника при включенном и выключенном вентиляторе. Разность фаз можно измерить методом, изложенным в пункте 1.2 или 1.3.

При измерении разности фаз методом курсорных измерений разности времен (см. пункт 1.2) необходимо осциллограф переключить

в режим экрана YТ. Нажмите кнопку “экран” (DISPLAY), расположенную в “Меню” (MENUS) верхней части панели управления. В правой части экрана появится меню этого режима с общим заголовком DISPLAY и с вертикально расположенными пунктами. Установите значение пункта «Format» в режим YТ. Установите цену деления по времени 2.5 мксек и подведите указатель момента срабатывания триггера (вертикальная стрелка в верхней части экрана) в центр экрана.

При выключенном вентиляторе поставьте источник и приемник (удаление около 15 см) на такое расстояние друг от друга, чтобы на экране осциллографа наблюдались две синусоиды с нулевым временным сдвигом. С помощью вентилятора направьте поток воздуха от источника к приемнику, при этом фаза волны изменится, и синусоида 2-ого канала сдвинется относительно первого на некоторое время. Переключателем “пуск/стоп”(Run/Stop) (на панели управления осциллографа) остановите изображение на экране. Нажмите кнопку курсор (Cursory) и верхний пункт меню (Type) установите в режим измерения времени (Time). На экране появятся две вертикальные линии, подведите одну к началу координат, а вторую к точке пересечения синусоиды и линии нулевого значения второго канала. Из третьего пункта меню (Delta) выпишите значение разности времен Δt и вычислите разность фаз: $\Delta\varphi = 2\pi\Delta t f$.

При измерении разности фаз методом фигур Лиссажу (см. пункт 1.3) режим работы осциллографа такой же, как во втором задании. При выключенном вентиляторе поставьте источник и приемник (удаление около 15 см) на такое расстояние друг от друга, чтобы на экране осциллографа наблюдалась наклонная прямая. Совместите её центр с началом координат экрана. Это можно сделать двумя способами: или отключить генератор, или установить на осциллографе первый и второй канал в режим заземления, при этом на его экране появится точка, которую надо подвести в центр экрана.

С помощью вентилятора направьте поток воздуха от источника к приемнику, при этом фаза волны изменится, и наклонная прямая превратится в эллипс. Переключателем “пуск/стоп”(Run/Stop) (на панели управления осциллографа) остановите изображение на экране, измерьте параметры эллипса и с помощью выражений (6а) и (6б) рассчитайте сдвиг фаз.

При измерениях с экрана осциллографа предпочтительней вместо x_0 определить $2x_0$ – разность между точками пересечения эллипса с осью X (см. рис.2), а вместо $x_{\max} - 2x_{\max}$ разность между максимальными и минимальными отклонениями луча, и подставить эти величины в формулу (6а). Это позволяет уменьшить ошибки, возникающей при сдвиге эллипса по оси X относительно начала координат. То же самое относится к выражению (6б).

При расчете фазы по формулам (6а) и (6б) возникает неопределенность с выбором знака, высокая частота звука не позволяет проследить глазом направление движения точки на экране осциллографа. Точка может пробегать эллипс по часовой или против часовой стрелки. В этих выражениях необходимо взять знак плюс. Такой выбор обусловлен физическими соображениями и учтен при записи выражений (8) и (9).

Примечание. Необходимо иметь в виду, что при определении сдвига фаз может возникнуть ошибка из-за того, что фаза определяется с точностью до 2π . Параметры установки выбраны так, что изменение фазы меньше $\pi/2$. Но в этом необходимо убедиться. Для этого при включенном вентиляторе поместите картонку (или подходящую тонкую книгу) между вентилятором (не прижимая к нему) и источником. Проследите за изменением фазы от закрытого до полностью открытого потока воздуха при плавном перемещении картонки. Если изменение фазы больше $\pi/2$, то необходимо отодвинуть вентилятор.

1. Проведите 10 ($N = 10$) измерений разности времен по методу пункта 1.2 или параметров эллипса (x_0, x_{\max}) и (y_0, y_{\max}) по методу пункта 1.3. Для каждого измерения вычислите разность фаз. Рассчитайте среднее значение сдвига фазы $\overline{\Delta\varphi}$ и среднеквадратическое отклонение среднего $S_{\overline{\Delta\varphi}}$:

$$\overline{\Delta\varphi} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \Delta\varphi_k \quad \text{и} \quad S_{\overline{\Delta\varphi}} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N (\Delta\varphi_k - \overline{\Delta\varphi})^2}{N(N-1)}}. \quad (11)$$

2. Для метода пункта 1.3 сравните результаты расчета фазы по формулам (6а) и (6б).

3. Рассчитайте скорость ветра по формуле (9), используя значение $\Delta\varphi$. Результат запишите в виде:

$$v = \bar{v} \pm \Delta v, ,$$

где \bar{v} – среднее значение и Δv – погрешность. Перед вычислением оцените порядки величин относительных погрешностей

$$\frac{\Delta v}{v} = 2 \frac{\Delta C}{\bar{C}} + \frac{\Delta f}{f} + \frac{\Delta r}{r} + \frac{S_{\Delta\varphi}}{\Delta\varphi} \text{ и отбросьте малые значения.}$$

Содержание отчёта

Отчет должен содержать:

1. Значение резонансной частоты.
2. Таблицы данных зависимости амплитуды от расстояния в ближней и дальней зоне.
3. Графики зависимости амплитуды от расстояния в ближней и дальней зоне.
4. Графики зависимости произведения амплитуды на r от расстояния в ближней и дальней зоне.
5. Данные измерения расстояний и частот по заданию 2. Результаты расчета значения длины волны и её погрешности. Результаты расчета скорости звуковой волны с погрешностью. Табличное значение скорости звука без учёта и с учётом температуры в помещении.
6. Данные 10 измерений изменения фазы звуковой волны при включении вентилятора. Результат расчета скорости ветра с погрешностью.

Контрольные вопросы.

1. Можно ли определить скорость ветра, применив следующий метод? При включенном вентиляторе измеряется скорость звука методом задания 2. Значение скорости ветра вычисляется, как разность двух скоростей звука с ветром и без ветра.
2. Каким другим способом можно измерить скорость потока воздуха, не прибегая к измерению разности фаз?

Дополнительные задания по курсу “Основы информационных технологий”

(Выбор заданий и их количество определяет преподаватель)

Выполните задания 1–3 в описании работы 5.1. или воспользуйтесь данными, полученные Вами ранее, если работа уже выполнялась.

Задание 4. Провести измерение скорости ветра изменив методику в задании 3 работы 5.1. Вначале включите вентилятор и подберите такое расстояние (на удалении приемника около 15 см), чтобы на экране “в среднем” наблюдалась наклонная прямая (изображение на экране не останавливайте). Выключите вентилятор, измерьте параметры эллипса и с помощью выражений (6а) и (6б) рассчитайте сдвиг фаз. Повторите выполнение пунктов 1–3 по этой методике. Сравните полученные значения скорости ветра и погрешности измерения с предыдущими результатами.

Задание 5. Измерение скорости ветра в предыдущем пункте проводится на основе измерения фазового сдвига при неизменном положении приемника. При изменении положения приемника изменяется фазовый сдвиг. Если сдвинуть приемник на расстояние, при котором компенсируется изменение фазы вызванное ветром, то значение этой фазы можно рассчитать, не прибегая к измерению разности фаз. Обозначим расстояние, на которое нужно сдвинуть приемник для компенсации, через Δr , тогда разность фаз равна: $\Delta\varphi = 2\pi f\Delta r/C$. Подставим это значение в выражение (8) и получим выражение для вычисления скорости звука:

$$v = C\Delta r/r \quad (12)$$

Проведите измерение скорости ветра по следующей методике. Включите вентилятор и подберите такое расстояние (на удалении приемника около 15 см), чтобы на экране “в среднем” наблюдалась наклонная прямая (изображение на экране не останавливайте). Запишите значение расстояния. Выключите вентилятор, сдвиньте приемник на такое ближайшее расстояние, чтобы эллипс вернулся (превратился) в исходную наклонную прямую, и запишите второе значение расстояния. Повторите измерения 10 раз. Рассчитайте средние значения Δr и погрешности по аналогии с выражениями (11). Вычислите

скорость ветра (12) и рассчитайте погрешность. Сравните результаты с ранее полученными значениями.

Работа 5.2.

**ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ ЗВУКА В ВОЗДУХЕ
МЕТОДОМ СТОЯЧЕЙ ВОЛНЫ**

Цель работы: определение скорости звука в воздухе методом стоячей волны.

Оборудование: установка для измерения скорости звука методом стоячей волны; генератор сигналов звуковой частоты GFG-8255A; осциллограф “Tektronix” (или любого типа с чувствительностью по вертикальному каналу не более 1 мВ/см).

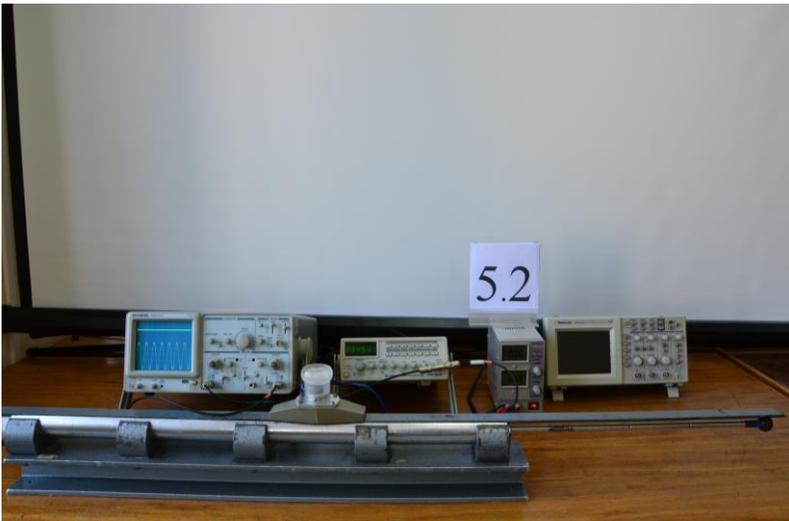


Рис.1. Фотография установки.

**1. Свойства стоячих волн и их применение
для определения скорости звука**

1.1. Распространение звука в трубе. Стоячие волны

Рассмотрим процесс установившихся звуковых колебаний [1, 2] в закрытой с обоих концов цилиндрической металлической трубе (см. [http://www.phys.nsu.ru/measuring/Иллюстрация к работе 5_2](http://www.phys.nsu.ru/measuring/Иллюстрация_к_работе_5_2)).

Пусть один из концов трубы является излучающей мембраной, а второй – закрыт металлическим поршнем из того же материала (см. рис. 2а).

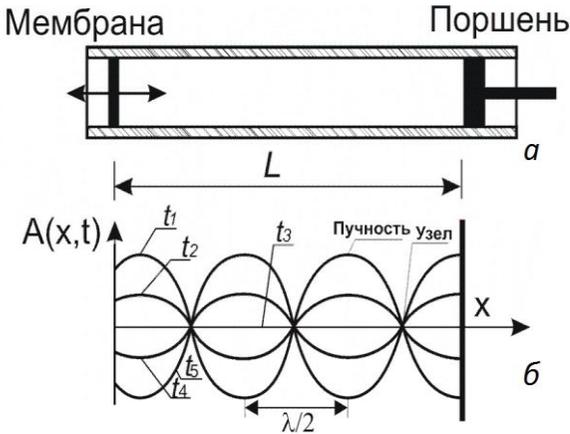


Рис. 2. Распространение волн в цилиндрической трубе: *a* – труба с поршнем и излучающей мембраной, *б* – значения звукового давления (в относительных единицах) в разные моменты времени с интервалом $1/8$ периода.

Считаем, что труба жесткая и параметры установки подобраны так, что достаточно рассмотреть одномерный случай. Пусть мембрана, совершающая гармонические колебания $A(t) = A_0 \cos \omega t$, возбуждает в трубе плоскую бегущую гармоническую волну $A_{np}(x,t) = A_0 \cos(\omega t - kx)$, где $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – волновое число, λ – длина волны.

При отсутствии поглощения амплитуда волны не зависит от координаты x .

При отражении от поршня возникает отражённая (бегущая влево) волна, выражение для которой с учетом фазового набегса падающей волны запишем в виде $A_{omp}(x,t) = A_1 \cos(\omega t - 2kL + kx)$. Сумма этих волн на границе контакта с поршнем, который считаем абсолютно жёстким, должна удовлетворять граничному условию, зависящему от того какая из физических величин взята для описания амплитуды звуковой волны. Если параметром A , описывающим волну, является звуковое давление, то выполнение граничного условия на границе

воздуха и поршня (при $x = L$) приводит к равенству амплитуд падающей и отраженной волн $A_{\text{опр}}(L, t) = A_{\text{пр}}(L, t)$, что дает $A_1 = A_0$.

Просуммируем эти две волны и получим уравнение для амплитуды давления звуковой волны внутри трубы, которое имеет следующий вид:

$$A(t) = A_{\text{cm}} \sin(\omega t - kL), \quad (1)$$

где величина

$$A_{\text{cm}} = 2A_0 \cos[k(L-x)] \quad (2)$$

не зависит от времени и дает значение амплитуды стоячей волны. Модуль этого выражения является амплитудой стоячей волны.

Выражения (1) и (2) описывают установившиеся колебания стоячей волны. В отличие от бегущих волн амплитуда стоячей волны зависит от координаты рис. 2б.

В приведенном выше решении отражение от левого края трубы (мембраны) не принималось во внимание. Как показывает анализ, учет отражения от левого края приводит лишь к изменению интенсивности установившихся колебаний в трубе и не меняет основные свойства стоячей волны. Так, например, если мембрана жесткая, потери малы и расстояние L кратно целому числу длин полуволн, то образуется интенсивная стоячая волна с амплитудой (в пучности) значительно превосходящей амплитуду излучаемой волны (см. «Иллюстрация к работе 5.2»). Это свойство стоячих волн широко используется в резонаторах.

Рассмотрим основные свойства стоячей волны.

1. Из выражения (2) видно, что амплитуда стоячей волны зависит от x и равна нулю в некоторых особых точках x_n , удовлетворяющих условию, $\cos[k(L-x_n)] = 0$. Из этого условия следует

$$k(L-x_n) = (2n+1)\frac{\pi}{2}, \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (3)$$

Эти особые точки называются *узлами* стоячей волны. Расстояние между соседними узлами равно

$$\Delta x = x_n - x_{n-1} = \lambda/2. \quad (4)$$

2. Амплитуда стоячей волны максимальна в других особых точках x_m , для которых $\cos[k(L-x_m)] = \pm 1$, откуда

$$k(L-x_m) = m\pi, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (5)$$

Эти точки расположены в середине между узлами и называются *пучностями* стоячей волны. Расстояния между соседними пучностями также равны половине длины волны.

3. Из выражения (2) следует, что на отражающей жесткой стенке (при $x = L$,) всегда имеет место *пучность давления* звуковой волны, а ближайший узел расположен на *расстоянии $\lambda/4$ от стенки*.

4. Узлы и пучности чередуются вдоль трубы и располагаются на расстояниях $\lambda/4$ друг от друга.

На рис. 1,б показан общий характер изменения стоячей волны вдоль оси X для пяти последовательных моментов времени $t_1 < t_2 < t_3 < t_4 < t_5$ с интервалом $1/8$ периода. Узлы и пучности сохраняют неизменное положение на оси X . Амплитуда и фаза колебания в произвольной точке оси, определяются выражениями (1) и (2), т.е. зависят от координаты x .

Примечание. В реальной физической установке в узлах стоячей волны амплитуда не равна нулю, а достигает некоторого минимума, из-за того, что амплитуда отраженной волны не равна амплитуде падающей.

1.2. Определение скорости звука методом стоячих волн

Определение скорости звука C в трубе методом стоячей волны основано на использовании её зависимости от частоты f и длины волны λ :

$$C = f\lambda. \quad (6)$$

Частота волны задается генератором, возбуждающим мембрану. Для измерения длины волны используется основное свойство стоячих волн – однозначная связь взаимного расположения особых точек (узлов и пучностей) с длиной волны λ . В работе предлагается использовать три варианта метода стоячих волн.

Вариант 1. Метод перемещения приемника звука. При фиксированных значениях положения поршня L и частоты f помещаем приемник, например, в положение пучности (перемещаем приемник до достижения максимума амплитуды колебаний). Пусть это будет положение l_1 ; (см. рис. 3). Затем перемещением приемника находим положение *соседней* пучности l_2 . Искомая длина волны равна $\lambda = 2|l_2 - l_1|$. Более точный результат получается при измерении

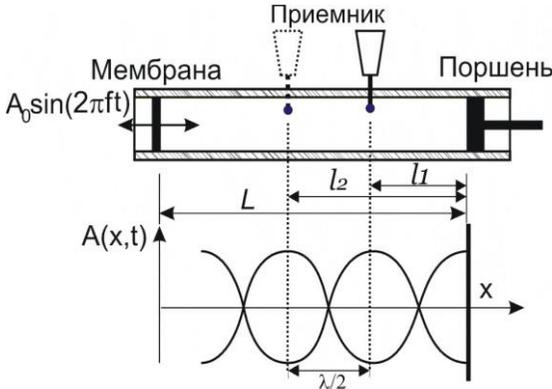


Рис.3. Метод перемещения приемника

между узлами, поскольку они являются более выраженными при малом уровне помех.

Вариант 2. Метод перемещения поршня. Помещаем приемник в положение какой-либо пучности/узла при произвольном положении поршня L_1 (см. рис. 4).

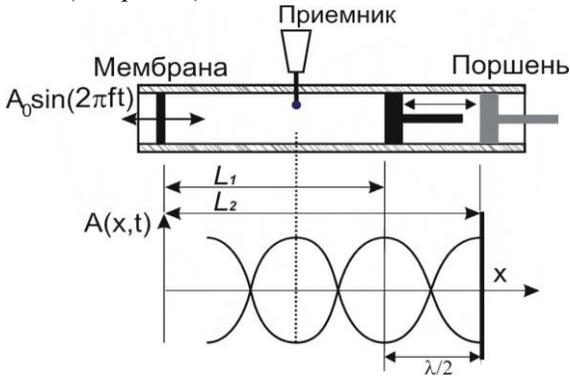


Рис. 4. Метод перемещения поршня

Смещение поршня из этого положения вначале приводит к уменьшению амплитуды сигнала в приемнике, а затем вновь увеличивает её до максимума. Фиксируем новое положение поршня L_2 , при котором приемник попадает в положение соседней пучности/узла. Искомая длина волны $\lambda = 2|L_2 - L_1|$.

Вариант 3. Метод изменения частоты. При некоторой частоте f_1 и расстоянии от мембраны до поршня L установим приемник в пучность волны (см. рис. 5). Пусть на расстоянии x_m при частоте сигнала f_1 между приемником и поршнем укладывается n полуволин (на рис. 4 – две полуволны). Медленно изменяя (например, увеличивая) частоту источника звуковой волны *при неизменном положении приемника и поршня* достигнем нового максимума звука в приемнике при некоторой частоте f_2 . Как видно из рисунка 4, в этом случае между поршнем и приемником будет укладываться на одну полуволну больше.

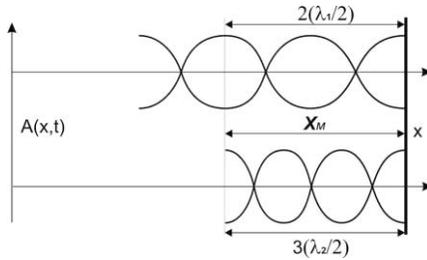


Рис. 5. Метод изменения частоты

Из условий $x_m = n \lambda_1/2 = (n+1)\lambda_2/2$ и $C = \lambda_1 f_1 = \lambda_2 f_2$ можно получить расчетную формулу для определения скорости звука:

$$C = 2x_m |f_2 - f_1| = 2x_m |\Delta f|. \quad (7)$$

2. Подготовка к проведению измерений

Для проведения измерений используется установка, изображенная на рис. 6. Источником звука служит динамик, помещенный в специальный держатель таким образом, чтобы генерируемая в трубе волна имела форму фронта максимально близкую к плоской.

Динамик подключен к генератору звуковых частот. Вдоль средней части трубы параллельно её оси прорезана щель. Приемник звука (микрофон) находится в ручке-держателе, закрепленной на "закрылках", прикрывающих щель. Выход микрофона с помощью кабеля подключается к входу осциллографа. Приемник с закрылками может перемещаться вдоль трубы. Второй конец трубы закрыт подвижным поршнем со штоком, с помощью которого поршень может перемещаться вдоль трубы.

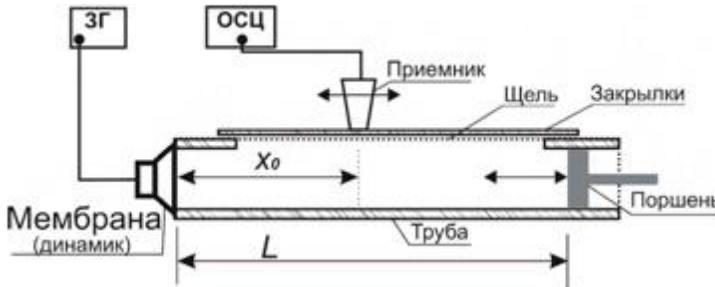


Рис. 6. Установка для измерения скорости звука

Включите генератор GFG-8255A (кнопка “Power”) и осциллограф “Tektronix” (кнопка на корпусе сверху). Установите режим работы генератора: нажмите кнопки [1k], [~]; установите ручку “AMPL” в среднее положение и ручкой “FRIQUENSE” (в положении “SWEEPOFF”) установите частоту около 1кГц.

Переключите осциллограф в режим автоматической развертки сигнала по времени. Если осциллограф находится не в этом режиме, нажмите кнопку “экран” (DISPLAY), расположенную в “Меню” (MENUS) верхней части панели управления. В правой части экрана появится меню этого режима с общим заголовком “DISPLAY” и с вертикально расположенными пунктами, напротив которых на панели управления расположены кнопки изменения параметров этих пунктов меню. Нажимая несколько раз на эти кнопки, установите параметры трех верхних пунктов в режим:

Type	Persist	Format
Dots	Off	YT
Способ Точки	Хранение Выключен	Формат U(t)

Это означает, что на экран выводится зависимость напряжения от времени точками и с обновлением при каждом запуске.

Считаем, что микрофон подключен к входу первого канала (CH1), а генератор ко второму каналу (CH2). В средней части панели управления нажмите кнопку меню первого канала (CH1 MENU), при этом в левой части экрана появится меню этого режима с общим заголовком CH1 и с вертикально расположенными пунктами. Установите параметры этих пунктов в режим:

Coupling	BWLimit	Volts/Div	Probe	Invert	
AC	Off	Coarse	1X	Off	
100MHz	Связь	Част.предел	вольт/дел.	Пробник	Инвертирование
	Закр.вход	Выкл.	Грубо	1X	Выкл.
		100MHz			

В этом режиме на входе осциллографа пропускается только переменная составляющая сигнала без частотного ограничения и инвертирования, входной кабель без делителя напряжения и ручка (Volts/DIV) установлена в режим грубого (большого) шага изменения

цены деления. Ручкой «Вольт/дел»(Volts/DIV) первого канала установите чувствительность канала, а ручкой «сек/дел.»(SEC/DIV) установите развертку так, чтобы на экране наблюдалась синусоида. Значения, установленные этими ручками, высвечиваются в нижней части экрана. Так, например, надпись:

CH1 100mv CH2 2.00v M 250µs CH1 \square 0.00v

означает, что цена деления (10 мм клетка на экране по вертикали) для 1-канала равна 100 mv, цена деления (10 мм клетка на экране по вертикали) для 2-канала равна 2.00v и цена деления развертки по времени (10 мм клетка на экране по горизонтали) для обоих каналов равна 250µs. Последние параметры в надписи сообщают о режиме работы блока синхронизации генератора развертки.

Для установки параметров развертки нажмите на кнопку «Меню синхронизации» (TRIGMENU), которая находится в разделе «Запуск»(TRIGGER) панели управления осциллографа. Опять же на экране появится меню этого режима с общим заголовком “TRIGGER” и пунктами меню, которые необходимо установить в следующие значения.

Type	Source	Slope	Mode	Coupling
Edge	Ch1	Rising	Avto	AC
Тип	Источник	Наклон	Мода	Связь
Уровень	Кан.1	Возраст.	Авто	Закр.вход

Эти параметры означают, что генератор развертки работает в автоматическом режиме, а его синхронизация (запуск) осуществляется по закрытому входу от 1-ого канала по нарастающему перепаду уровня сигнала. Часть этой информации приведена в конце строки в приведенном выше примере, в котором последние цифры обозначают уровень запуска. Кроме цифрового значения уровня запуска его положение показано стрелкой на правой стороне экрана осциллографа. Установка уровня запуска осуществляется ручкой “уровень”(LEVELTRIGGER), которая расположена в разделе “Запуск” (TRIGGER) панели управления. Установите уровень запуска около 0.0 В, при этом стрелка справа должна установиться напротив стрелки “1”, находящейся с левой стороны экрана и показывающей нулевое значение сигнала 1-ого канала.

3. Задания

3.1. Определение частотного диапазона установки по соответствию реальных и теоретических свойств стоячих волн.

1. Схема установки для проведения измерений приведена на рис. 5. Сместите приемник с закрылками в крайнее правое положение и измерьте максимальное расстояние L_m , на которое можно сместить поршень. Положение торца источника звука примем за начало координат X . Убедитесь, что вы научились измерять координаты x_0 (приемника) и L (поршня) при различных положениях.

2. Поставьте поршень в крайнее правое положение L_m . Установите на генераторе частоту примерно 1кГц и ручку “AMPL” в среднее положение.

3. Перемещая приемник вдоль трубы, наблюдайте наличие минимумов и максимумов (узлов и пучностей) стоячей волны.

4. Определите *частотный диапазон* работы установки (минимальную f_n и максимальную f_v частоты, при которых положения узлов и пучностей хорошо различимы). При работе на высоких частотах, возможно, понадобится увеличить уровень выходного напряжения генератора.

5. Определите положение ближайшего к поршню узла стоячей волны и проверьте, насколько симметрично взаимное расположение узлов и пучностей вдоль трубы. Наблюдения проделайте для трех частот: f_n, f_v и некоторой средней частоты f_c .

Примечание. Вывод уравнений и основных свойств стоячей волны, приведенный в пункте 1, сделан для случая идеально упругой круглой трубы с плоским источником волны и отражением без потерь. В реальной установке на свойства стоячих волн влияет наличие разреза трубы, не идеальность источника волн и их отражения от поршня, конечные (не точечные) размеры приемника звука. В результате этого отмеченные выше четыре основных свойства стоячих волн выполняются лишь в некотором приближении, что будет влиять на точность определения скорости звука в трубе.

6. Подумайте, что должно быть расположено в плоскости источника звука (узел, пучность или произвольная "фаза" стоячей волны). Проверьте это экспериментом. Проверку проделайте для различных частот (например, для f_n, f_v и f_c).

7. На основании пунктов 5 и 6 определите, какие узлы и пучности нужно взять далее для измерения скорости звука – ближние к поршню или источнику звука? Или лучше взять данные, усредненные по всей длине трубы?

3.2. Измерение скорости звука

1. Метод перемещения приемника. Перемещая приемник звука, измерьте расстояние Δx между соседними **узлами** стоячей волны при фиксированных f и L . (Лучше установить максимально возможную величину L_m .) Измерения сделайте для f_n, f_6 и двух-трех частот в середине диапазона. Рассчитайте скорость звука по формуле

$$C = 2\Delta x f. \quad (8)$$

Примечание. Для каждой частоты лучше определить Δx как среднее арифметическое по всем Δx_i , получающимся в пределах перемещения приемника вдоль трубы, и стандартную погрешность [3, 4]

$$\bar{\Delta x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta x_i, \quad S_{\bar{\Delta x}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(\Delta x_i - \bar{\Delta x})^2}{n(n-1)}} \quad (9)$$

Однако усреднять данные по всем частотам в данном эксперименте не стоит, поскольку не идеальности установки приводят к такой частотной зависимости погрешности измерения, которая не является статистической (случайной) погрешностью.

Выражение для абсолютной погрешности скорости звука, в соответствии с формулой (8), вычисляется в виде:

$$\Delta C = 2f S_{\bar{\Delta x}} + 2\bar{\Delta x} \Delta F, \quad (10)$$

где ΔF – приборная погрешность определения частоты.

2. Метод перемещения поршня. Перемещая отражающий поршень, измерьте расстояние Δx между **узлами** стоячей волны при фиксированных f и X_0 . Рассчитайте скорость звука и её погрешность по формулам, приведенным в методе 1.

Примечание. Из-за ограниченной длины трубы в данном случае измерения можно сделать лишь для относительно высоких частот. Наряду с частотой f_6 лучше выбрать те средние частоты, для которых проделаны измерения в предыдущем пункте задания. Это поможет определить, насколько сказываются частотные погрешности на измерение скорости звука (из-за не идеальности установки).

3. Метод изменения частоты. При фиксированном положении приемника (X_0) и поршня (L) измерьте частоты f_i ; для которых приемник оказывается в положении узла.

Измерения проделайте двумя способами.

Способ 1. Установите приемник в ближайший к поршню узел для $f = f_n$. Увеличивая частоту до f_e запишите все частоты, при которых приемник фиксирует узел стоячей волны. Для всех пар частот вычислите разности $\Delta f = (f_{i+1} - f_i)$, определите их среднее значение и стандартную ошибку:

$$\bar{\Delta f} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta f_i, \quad S_{\bar{\Delta f}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(\Delta f_i - \bar{\Delta f})^2}{n(n-1)}} \quad (11)$$

Скорость звука и её абсолютная погрешность в соответствии с (7) определите по формулам:

$$C = 2(L - X_0) \bar{\Delta f}, \quad (12)$$

$$\Delta C = 2(L - X_0) S_{\bar{\Delta f}} + 2\bar{\Delta f} \Delta L + 2\bar{\Delta f} \Delta X_0; \quad (13)$$

где ΔL и ΔX_0 – абсолютные погрешности измерения расстояний.

Способ 2. Установите расстояние $L = L_m$ и приемник в ближайший к поршню узел для $f = f_n$. Увеличивая частоту, найдите значение f_2 , соответствующее соседнему узлу. При частоте $f = f_2$ вновь сместите приёмник в положение ближайшего к поршню узла. Затем изменением частоты найдите новое значение f_3 , соответствующее соседнему узлу. Вновь переместите приемник в ближайший к поршню узел и т.д. Следуя этому алгоритму, нужно найти все пары частот (f_i, f_{i+1}) в диапазоне от f_n до f_e . Далее проведите расчеты как в предыдущем варианте.

3.3. Обработка результатов измерений и их анализ

1. Результаты измерений представьте в виде следующей таблицы.

		C , м/с	$\pm\Delta C$, м/с	$\pm\delta C$, %
Метод 1	$f_n =$			
	$f_{c1} =$			
	$f_{c2} =$			
	$f_{c3} =$			
	$f_b =$			
Метод 2.	$f_{c1} =$			
	$f_{c2} =$			
	$f_{c3} =$			
	$f_b =$			
Метод 3.	Вариант 1			
	Вариант 2			

Здесь ΔC и δC ~ абсолютная и относительная погрешность результата, определенная для каждого метода с учетом приборных погрешностей измерения величин, входящих в расчетную формулу.

2. Сравните полученный результат с табличным значением скорости звука с учетом температуры в помещении. Используйте зависимость скорости звука от температуры для воздуха в системе СИ: $C(T) = 20,1 \sqrt{T}$, где T – температура в К [5].

Если разница между экспериментально измеренной и табличной скоростью превышает абсолютную погрешность, то это указывает на наличие других систематических погрешностей измерения (не приборных). Попробуйте определить возможные их источники.

3. Сравните результаты измерений, полученные при различных частотах. Подумайте, должна ли зависеть точность результата от частоты, и сравните свои предположения с экспериментальными данными.

Контрольные вопросы

1. Расстояние между узлами и пучностями одинаковое. Почему в задании предлагается измерять расстояние между узлами, а не пучностями?

Содержание отчёта

Отчёт должен содержать

1. Частотный диапазон работы установок.
2. Таблицы экспериментальных данных по всем заданиям.
3. Значения скорости звука, полученные по трём методам и их сравнение.

Рекомендуемая литература

1. Горелик Г. С. Колебания и волны. Введение в акустику, радиофизику и оптику. Изд-во М. Физматлит, 2008 г., 656 стр. или Электронная версия. Физматлит, 2011 г. 667 стр.
2. Измерительный практикум. Сборник лабораторных работ для студентов нефизических специальностей. Новосибирск, Изд-во НГУ, 2001 г. 141 стр.
3. Методы физических измерений. Лабораторный практикум по физике. Под ред. Р. И. Солоухина. Новосибирск: Наука. Сиб. отделение, 1975 г. 290 стр.
4. Князев Б. А., Черкасский В. С. Начала обработки экспериментальных данных. Новосибирск: Изд-во НГУ, 1996г.
5. Сивухин Д. В. Общий курс физики, т.2. 2003 г

Приложение

Как и любой другой волновой процесс, звук характеризуется скоростью распространения, амплитудой и частотой изменения давления, плотности, смещения и скорости смещения частиц относительно равновесного положения. При воздействии на упругую среду внешних сил возникают упругие волны. В зависимости от способа приложения этих сил это могут быть продольные волны сжатия и разрежения, поперечные волны в натянутой струне или поперечные волны сдвига соседних слоев, а также волны кручения при закручивании конца стержня. Скорость волны определяется модулями упругости и плотностью среды.

Например, в газах скорость продольной волны равна $C = \sqrt{\frac{K}{\rho}}$. В

случае поперечных волн: в натянутой струне $C = \sqrt{\frac{F}{\rho S}}$, в упругой

среде для волн сдвига $C = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$. В эти выражениях: ρ – плотность,

K – модуль объемного сжатия, F – натяжение, S – площадь сечения и G – модуль сдвига. В газах могут существовать только продольные волны сжатия и разрежения, так как при сдвиговых деформациях упругих сил в газах не возникает. При наличии границ раздела в упругой среде существуют волны с более сложными характеристиками колебаний частиц по отношению к направлению распространения – волны смешанного типа. Скорости таких волн отличаются от скоростей продольных и поперечных волн.

Плоскую волну, распространяющуюся вдоль оси X , можно сформировать в длинной трубе, в которой находится поршень, колеблющийся по некоторому закону вдоль оси X . В этом случае вдоль оси X будет распространяться звуковое возмущение, под действием которого частицы среды будут смещаться относительно положения равновесия. Это смещение $s(t, x)$ будет зависеть от времени t в данной точке x , а при фиксированном времени от координаты x .

Простейшее дифференциальное уравнение, описывающее распространение волны, называется волновым уравнением и для плоской волны имеет вид: $\frac{d^2s}{dt^2} = C^2 \frac{d^2s}{dx^2}$, где C – скорость распространения волны. Решением волнового уравнения является функция $s(t, x) = s(t - \frac{x}{C})$ для волны бегущей в положительном направлении оси X и $s(t, x) = s(t + \frac{x}{C})$ – в отрицательном направлении. На расстояние x волна придёт через время $t = \frac{x}{C}$. Функция s и закон колебания поршня во времени должны быть согласованы.

При колебании поршня по гармоническому закону функция s также является гармонической. Для гармонической волны, бегущей в положительном направлении оси X , решение волнового уравнения имеет вид: $s(t, x) = s_0 \cos(\omega(t - \frac{x}{C}))$, где $\omega = 2\pi f$ – круговая (циклическая) частота. За время одного колебания волна будет смещаться на расстояние равное длине волны: $x = \lambda$. Решение можно переписать в виде $s(t, x) = s_0 \cos(\omega t - kx)$, или $s(t, x) = s_0 \cos(\omega t - \frac{2\pi x}{\lambda})$ здесь $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число. Таким образом, определив длину волны, можно вычислить скорость звука в среде.

В качестве величины $A(t, x)$, описывающей звуковые волны, могут служить и другие физические характеристики среды, например, *колебательное смещение* (смещение частиц среды по отношению к равновесному значению) или *колебательная скорость*, которая является производной по времени от колебательного смещения. Направление колебательной скорости совпадает с направлением колебательного смещения.

Следует различать колебательное смещение (или колебательную скорость) частиц среды в звуковой волне (см. рис. 1а введения) и тепловое хаотическое движение молекул. Под колебательным смещением понимается смещение некоторого единичного объёма, малого

по сравнению с длиной волны и большого по сравнению с расстоянием между молекулами или с расстоянием свободного пробега в газе. Колебательная скорость звуковой волны много меньше средней скорости хаотического движения молекул.

Зависимость амплитуды от радиуса можно получить из закона сохранения энергии. Среднее значение энергии за период колебания w единицы объёма для гармонической волны пропорциональна произведению плотности среды ρ на квадрат амплитуды колебательной скорости v : $w = \frac{\rho v^2}{2}$. Эта энергия распространяется в направлении распространения волны со скоростью звука. Интенсивностью I волны называют величину $I = wC = \frac{\rho v^2}{2} C$, которая имеет смысл потока энергии через единицу площади.

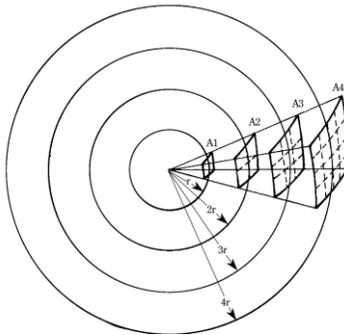


Рис. 1. Сферический волновой фронт $A(t, r)$.

Из закона сохранения энергии, следует, что поток энергии через любой замкнутый объём, внутри которого нет источников, равен нулю. Тогда, например, для сферической волны поток энергии I через сферу (с центром в источнике) любого радиуса постоянен: $IS = const$, где $S = \pi r^2$ – площадь сферы (см. рис. 1). Используя записанное выше выражение для потока энергии получим: $\pi \frac{\rho v^2}{2} Cr^2 = const$ или $vr = const$. Отсюда следует, что колебательная

скорость сферической звуковой волны обратно пропорциональна радиусу $v/v_0 = r_0/r$, где v_0 – амплитуда колебательной скорости на некотором радиусе r_0 . Если вместо колебательной скорости взять амплитуду смещения (давления и т. д.), то энергия W будет пропорциональна квадрату этой амплитуды с некоторым другим набором параметров. Поэтому эти амплитуды так же будут изменяться обратно пропорционально радиусу.