



## Исследование свойств звуковой волны

### Цель работы

Целью работы являются:

- 1) экспериментальное определение длины звуковой волны;
- 2) исследование процессов распространения и отражения звуковой волны от препятствий.

### Метод экспериментального исследования явления

В работе с помощью датчика звука (микрофона) измеряется частота звуковых волн, исследуются процессы распространения и отражения звуковых волн от экрана.

### Теория

*Звуковыми* называются упругие волны, частоты которых лежат в пределах восприятия органами слуха человека, в диапазоне примерно от 16 до 25 000 Гц.

В общем случае колебания частиц среды при распространении звуковой волны могут происходить в поперечном и продольном направлениях. В отличие от твердого тела жидкости и газы обладают только объемной упругостью, но не упругостью формы. Поэтому в них могут распространяться только *продольные* возмущения и не могут распространяться возмущения *поперечные*. Таким образом, в воздухе звуковая волна представляет собой следующие друг за другом сжатия и разрежения газа, причем частицы газа колеблются вдоль направления распространения волны.

Скорость распространения звуковых волн в разных средах различна. Медленнее всего звук распространяется в газах (скорость звука в воздухе при температуре 20°C составляет 340 м/с). В более плотных средах — жидкостях и твердых телах — звук распространяется быстрее (скорость звука в стальном рельсе составляет 5000 м/с).

Скорость распространения звуковой волны в газообразной среде можно вычислить по формуле Лапласа:

$$c = \sqrt{\gamma \frac{RT}{\mu}},$$

где  $T$ ,  $\mu$  — температура и молярная масса газа соответственно;  $\gamma$  — адиабатическая постоянная газа (для воздуха = 1,4);  $R$  — универсальная (молярная) газовая постоянная (8,31 Дж/(моль · К)).

Скорость распространения звуковой волны в газе примерно совпадает со средним значением скорости теплового движения молекул газа, которая определяется температурой и составом вещества. Таким образом, скорость звука не должна зависеть от его частоты, что и подтверждается на практике.

Частота звука, измеряемая в герцах (Гц), связана с его длиной волны известным соотношением  $\nu = c / \lambda$  (в общем случае звуковая волна является суперпозицией волн с разными частотами). От частоты звука зависят свойства звуковой волны: ее затухание и отражение.

В процессе распространения звуковых волн в среде происходит их затухание. Амплитуда продольных колебаний частиц воздуха постепенно уменьшается с увеличением расстояния от источника звука. Часть энергии, которая переносится звуковыми волнами, поглощается средой. Затухание звуковых волн обусловлено внутренним трением (вязкостью) газа, его температурой, составом и частотой звуковой волны.

Амплитуда звуковых волн определяет величину *звукового давления*, а значит, громкость звука. Акустическим эталоном звукового давления, близким к абсолютному порогу слухового восприятия человеческого уха, принято считать величину  $P_0 = 2 \cdot 10^{-5}$  Н/м<sup>2</sup>.

На практике для характеристики звука обычно используют логарифмическую величину — так называемый уровень *звукового давления*  $N$ , измеряемый в децибелах (дБ) и определяемый по формуле

$$N = \lg \left( \frac{P_x}{P_0} \right) \quad \text{где } P_x \text{ — действующее звуковое давление.}$$

По шкале децибел оценивается также *интенсивность звука* (сила звука) — величина, равная количеству энергии, переносимой звуковой волной через единичную площадку, перпендикулярную направлению распространения волны, за единицу времени. Принимая за эталонное значение

интенсивности  $I_0 = 10^{-12}$  Вт/м<sup>2</sup>, число децибел определяют по формуле  $L = \lg\left(\frac{I_x}{I_0}\right)$ , где  $I_x$  – интенсивность данного звука.

Интенсивность звука пропорциональна квадрату звукового давления, поэтому

$$10 \lg\left(\frac{I_x}{I_0}\right) = 20 \lg\left(\frac{P_x}{P_0}\right).$$

Звуковая волна может испытывать отражение и рассеяние от препятствий, встречающихся на ее пути (например, от стены). Доля отраженной энергии звуковой волны зависит в основном от соотношения плотностей газа и препятствия и от состояния поверхности раздела сред. Отражение звука, распространяющегося в воздухе, от твердого тела или жидкой поверхности происходит практически полностью. Для звука справедлив закон отражения, аналогичный закону отражения света.

Источником звуковых колебаний может служить любое тело, которое колеблется со звуковой частотой. Так, например, мембрана громкоговорителя колеблется с вынужденной частотой, соответствующей частоте переменного электрического тока, который протекает в обмотке катушки громкоговорителя. Способность тел излучать звук зависит от размеров их поверхностей. Большая площадь поверхности тела способна лучше воспроизводить звук с меньшей частотой.

Для регистрации звука используются обратные преобразователи звуковых колебаний в колебания электрического тока, например микрофон. Мембрана микрофона должна быть максимально легкой, чтобы с высокой чувствительностью регистрировать колебания звуковой волны.

### Контрольные вопросы

1. К каким волнам относятся звуковые волны – поперечным или продольным?
2. Чему равна частота звука в воздухе при комнатной температуре, если длина звуковой волны равна 1м?
3. Почему электрический сигнал, получаемый на выходе микрофона, повторяет временной профиль звуковой волны?

### Оборудование экспериментальной установки

Датчик звука (микрофон):  
Громкоговоритель.  
Функциональный генератор.  
Штатив универсальный с крепежом.  
Экран размером не менее 30×30 см.



**Примечание.** Вместо экрана можно использовать книгу большого размера.

### Параметры экспериментальной установки

Длительность проведения эксперимента  
Весь цикл измерений может быть проведен за 15–20 мин.

На обсуждение содержания эксперимента и его результатов, ответы на вопросы во время выполнения измерений и после их окончания отводится 15–20 мин.

#### Техника безопасности

Во время проведения эксперимента необходимо соблюдать все правила техники безопасности, указанные для персонального компьютера как электрического оборудования.



Используемое измерительное оборудование (система сбора данных, датчик звука (микрофон)) экспериментальной установки рассчитано на питание от низковольтного напряжения, не представляющего опасности для человека.

### Обеспечение наглядности результатов эксперимента

Штатив с микрофоном и громкоговоритель с функциональным генератором следует располагать на демонстрационном столе вдоль его длинной стороны так, чтобы обеспечить возможность удаления микрофона от громкоговорителя на расстояние 3–5 м.

Для обеспечения удобства управления демонстрацией эксперимента компьютер необходимо располагать достаточно близко от установки (на расстоянии не более 1,5 м).

Экран компьютера рекомендуется продублировать с помощью проектора.

### Монтаж и настройка

Микрофон закрепляется на штативе в горизонтальном положении на высоте, соответствующей центру громкоговорителя. Необходимо предусмотреть возможность поворота громкоговорителя вокруг вертикальной оси, перемещение громкоговорителя (или микрофона) в пределах нескольких метров.

### Подготовка приборов

Перед началом проведения эксперимента необходимо выполнить следующее:

Внимательно прочитайте инструкции, подготовьте необходимое оборудование, соберите установку в соответствии с разделом «Монтаж и настройка».

Запустите программу **SensorLab ПО**.

Подключите датчик звука (микрофон) к аналоговому входу системы сбора данных.

Подключите к функциональному генератору громкоговоритель, предварительно уменьшите до нуля амплитуду сигнала генератора.

### Методика выполнения эксперимента

#### Проведение измерений

Включите генератор в электрическую сеть, установите частоту сигнала в диапазоне 500–1000 Гц, форму сигнала – гармоническую, амплитуду сигнала – по приемлемой громкости звука.

Нажмите кнопку **Пуск**. При этом на экран дисплея начинают выводиться два графика сигнала с выхода микрофона: один график — с большим масштабом по оси времени (по оси абсцисс, интервал 20 с), другой — с меньшим масштабом по оси времени (по оси абсцисс, интервал 0,1 с). Значение основной частоты сигнала на выходе микрофона рассчитывается автоматически и отображается в поле **Частота сигнала**.

Убедитесь, что эта частота совпадает с частотой сигнала генератора, а форма сигнала близка к гармонической. Повторите наблюдения, установив другую частоту сигнала генератора.

Установите частоту сигнала генератора 2 кГц. Перемещайте громкоговоритель в направлении от микрофона. Во время проведения опыта на графике с большим масштабом по оси времени отобразится уменьшение амплитуды сигнала по мере увеличения расстояния до источника звука.

Установите микрофон перпендикулярно плоскости громкоговорителя. Вращайте громкоговоритель вокруг вертикальной оси. При этом на графике с большим масштабом по оси времени отобразится изменение амплитуды сигнала на выходе микрофона.

**Примечание.** Можно оценить растреп конуса, в котором распространяется звуковая волна (так называемая диаграмма направленности громкоговорителя).

Установите микрофон перпендикулярно плоскости громкоговорителя. Поместите между микрофоном и громкоговорителем экран, при этом на графике с большим масштабом по оси времени отобразится уменьшение амплитуды сигнала. Уменьшите частоту сигнала генератора до 200–300 Гц, наблюдайте уменьшение эффекта ослабления сигнала.

Установите громкоговоритель сбоку от микрофона. Установите частоту сигнала генератора 2 кГц. Возьмите экран и, вращая его, направьте отраженную звуковую волну на микрофон. Добейтесь наибольшего эффекта отражения по максимальному значению амплитуды сигнала на выходе микрофона.



## Анализ результатов

Объясните учащимся, что вынужденные колебания мембраны громкоговорителя приводят к продольным колебаниям частиц воздуха, воздействующих на мембрану микрофона, которая, в свою очередь, начинает совершать колебания с той же частотой.

Обратите внимание учащихся на ослабление интенсивности звуковой волны с увеличением расстояния до источника звука и объясните, что это ослабление вызвано затуханием колебаний в результате трения (вязкости воздуха) и расхождением звуковой волны в пространстве в широкий конус (с удалением микрофона давление на его мембрану уменьшается обратно пропорционально квадрату расстояния до источника звука).

Объясните процессы отражения звуковой волны от препятствия и ее ослабления. Оцените длину волны звука и сравните ее с размером препятствия.

## Справка

### Принцип работы датчика звука (микрофона)

В данном эксперименте используется микрофон электретного типа, работающий в диапазоне частот от 20 до 16 000 Гц.

Рабочая часть обычного конденсаторного микрофона представляет собой конденсатор с одной подвижной обкладкой, которая является мембраной и может перемещаться под воздействием звуковой волны, изменяя емкость конденсатора. К обкладкам такого конденсатора необходимо подводить достаточно высокое напряжение (около сотни вольт).

Электретный микрофон является частным случаем конденсаторных микрофонов.

Он отличается от обычного конденсаторного микрофона наличием специального слоя из электрета, расположенного на одной из обкладок конденсатора или в зазоре между обкладками. Электретом является диэлектрик, находящийся в наэлектризованном, заряженном состоянии. Электреты можно получить, например, из полимерной диэлектрической пленки, облученной пучком электронов или протонов. Наличие заряженного слоя позволяет уменьшить напряжение, подводимое к обкладкам конденсатора.

В конструкцию микрофона входит операционный усилитель сигнала, который питается от платы сбора данных напряжением +5 В с током 7,5 мА. После усиления сигнал попадает на вход платы сбора данных, оцифровывается и выводится на экран компьютера.

При работе с микрофоном необходимо помнить, что при воздействии на микрофон звуковых волн одинаковой интенсивности, но разных частот амплитуда полученного сигнала будет существенно различаться (может даже в 100 раз), т. е. микрофон обладает непостоянной амплитудно-частотной характеристикой. Это затрудняет проведение даже относительных измерений громкости звука на разных частотах. Для решения таких задач существуют специальные калиброванные микрофоны с измеренной производителем амплитудно-частотной характеристикой.

### Частоты и длины волн некоторых источников звука

Источник звука	Частота (Гц)	Длина волны (см)
Нижняя нота рояля	27,5	1240
Низкий певческий бас	80	270
Нота ля первой октавы	440	78
Высокий тенор	500	69
Альт	650	53
Верхнее до	1048	33
Колоратурное сопрано	1350	25
Самая высокая нота рояля	4186	8,2



### Интенсивность некоторых источников звука

Интенсивность (Вт/м <sup>2</sup> )	Уровень интенсивности (дБ)	Качественная субъективная оценка	Источник звука
$10^{-11}$	10	Едва слышно	Спокойное дыхание
$10^{-10}$	20	Очень тихо	Шелест листвы
$10^{-9}$	30	Тихо	Перелистывание книги
$10^{-8}$	40	Умеренно	Тихая контора
$10^{-7}$	50	Умеренно	Домашняя обстановка
$10^{-6}$	60	Умеренно	Обычный разговор
$10^{-5}$	70	Умеренно	Лектор
$10^{-4}$	80	Шумно	Уличный транспорт
$10^{-3}$	90	Очень шумно	Близкоидущий поезд
$10^{-2}$	100	Очень шумно	Пожарная сирена
$10^{-1}$	110	Невыносимо	Взлет авиалайнера
1	120	Болевое ощущение	Разрыв артиллерийского снаряда