

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО  
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР

КУБЫШЕВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ им. академика С. П. КОРОЛЕВА

---

# ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ ЗВУКА В ВОЗДУХЕ МЕТОДОМ РЕЗОНАНСА

Утверждено редакционным  
советом института  
в качестве методических указаний  
к лабораторной работе № 1—21

Методические указания к лабораторной работе содержат теоретическую часть, знакомящую студентов с методом измерения скорости звука путем установления в среде стоячих волн, описание экспериментальной установки, порядок выполнения практической части, обработку полученных результатов, контрольные вопросы, список рекомендуемой литературы. Использована следующая нумерация: 1 — шифр лаборатории механики и молекулярной физики, принятый на кафедре, 21 — порядковый номер работы, в соответствии с которым пронумерованы приборы и принадлежности в лаборатории.

Лабораторные работы предназначены для студентов всех факультетов дневного и вечернего отделений.

Составители: Н. В. Мышкина, Ф. Д. Кочанов

Рецензенты: В. М. Шмаков, В. С. Кононенко

Цель работы: определение скорости звуковых волн.

### ОПИСАНИЕ МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЙ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Упругие волны в среде, имеющие частоту от 16 до 20000 Гц, называются звуковыми волнами. Звуковая волна в газе — продольная волна, т. е. распространяющаяся в пространстве последовательность чередующихся областей сжатия и разрежения газа. Теоретическое значение скорости звуковых волн зависит от температуры  $T$  и молярной массы газа  $M$ :

$$v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}, \quad (1)$$

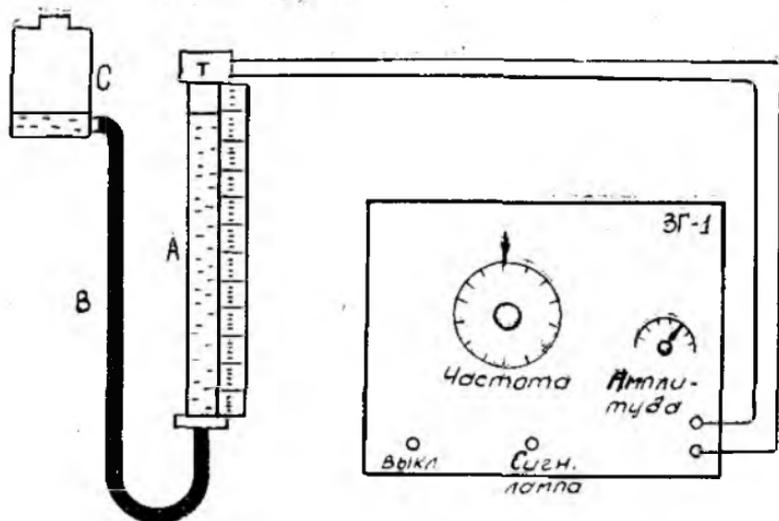
где  $\gamma$  — постоянная адиабаты,  $R$  — универсальная газовая постоянная ( $R = 831 \cdot 10^3$  Дж/кг · кмоль). Для воздуха вблизи комнатных температур  $T = 300$  К;  $\gamma = 1,4$ ;  $M = 29$  кг/кмоль.

Экспериментально скорость распространения звука в воздухе может быть определена различными методами. В работе скорость звука определяется методом резонанса. Установка для измерения скорости звука изображена на рисунке. Она состоит из стеклянной трубки  $A$ , соединенной резиновой трубкой  $B$  с сосудом  $C$ . Параллельно трубке установлена измерительная линейка. Трубка и сосуд наполнены водой до некоторого уровня. Переменное напряжение от генератора ЗГ-1 подается на телефон  $T$ . Телефонная мембрана возбуждает звуковые колебания в воздушном столбе, ограниченном с другой стороны поверхностью воды в трубке.

Если изменять длину воздушного столба, поднимая или опуская сосуд с водой, то при определенной его длине звучание столба воздуха резко усиливается, наблюдается явление резонанса.

Пусть звуковая волна движется сверху вниз от телефона к поверхности жидкости вдоль оси  $x$  (начало отсчета  $x = 0$  расположено у поверхности воды).

Запишем уравнения падающей  $\xi_1(x, t)$  и отраженной  $\xi_2(x, t)$



волн. Учтем, что при отражении от более плотной среды фаза колебаний меняется на  $\pi$ :

$$\begin{aligned}\xi_1 &= a \cos(\omega t + kx + \alpha_1), \\ \xi_2 &= a \cos(\omega t - kx + \alpha_1 + \pi),\end{aligned}$$

где  $\xi$  — смещение частиц воздуха из положения равновесия в точке, отстоящей на расстояние  $x$  от начала координат;  $a$  — максимальное смещение частиц воздуха из положения равновесия, т. е. амплитуда волны;  $\omega$  — циклическая частота колебаний, связанная с частотой колебаний  $\nu$  соотношением  $\omega = 2\pi\nu$ ;  $k$  — волновое число, равное  $\frac{2\pi}{\lambda}$ ;  $\alpha_1$  — начальная фаза колебаний.

При наложении этих волн возникает результирующее колебание точек среды, называемое стоячей волной. Уравнение стоячей волны  $\xi(x, t)$  имеет вид

$$\begin{aligned}\xi &= \xi_1 + \xi_2 = 2a \cos\left(kx - \frac{\pi}{2}\right) \cos\left(\omega t + \alpha_1 + \frac{\pi}{2}\right) = \\ &= 2a \sin kx \cos\left(\omega t + \alpha_1 + \frac{\pi}{2}\right).\end{aligned}\quad (2)$$

Из этого уравнения видно, что в каждой точке стоячей волны колебания частиц воздуха происходят с одной и той же частотой  $\omega$ , но амплитуда колебаний

$$A = |2a \sin kx| \quad (3)$$

зависит от расстояния  $x$ .

В точках, координаты которых удовлетворяют условию

$$kx = \frac{2\pi x}{\lambda} = \pm (2n + 1) \frac{\pi}{2}, \quad n = 0, 1, 2, \dots,$$

амплитуда колебаний максимальна. Эти точки называются пучностями стоячей волны. Координаты пучностей

$$x_{\text{пучн}} = (2n + 1) \frac{\lambda}{4}, \quad n = 0, 1, 2 \dots \quad (4)$$

В точках, координаты которых удовлетворяют условию

$$\frac{2\pi x}{\lambda} = \pm n\pi, \quad n = 0, 1, 2 \dots,$$

амплитуда колебаний обращается в нуль. Эти точки называются узлами стоячей волны. Координаты узлов

$$x_{\text{узел}} = \pm n \frac{\lambda}{2}; \quad n = 0, 1, 2 \dots \quad (5)$$

Из формул (4) и (5) следует, что расстояния между соседними узлами и соседними пучностями равно  $\frac{\lambda}{2}$ , а пучности и узлы сдвинуты относительно друг друга на четверть длины волны.

Как видно из выражения (3), у поверхности воды в точке  $x=0$  возникает узел стоячей волны ( $A=0$ ). В точке  $x=l$  будет пучность стоячей волны, т. е.  $A = 2a \sin kl = 2a$ , если

$$kl = (2n + 1) \frac{\pi}{2}; \quad l = (2n + 1) \frac{\lambda}{4}, \quad n = 0, 1, 2 \dots \quad (6)$$

Таким образом, стоячая волна в воздушном столбе образуется, если существует определенное соотношение между длиной волны звука  $\lambda$  и длиной воздушного столба  $l$ , а именно: длина воздушного столба равна нечетному числу четвертей длины волны звука. При других соотношениях между ними стоячая волна не образуется, бегущие волны гасят друг друга.

Частоты  $\omega_n = \frac{2\pi v}{\lambda_n}$ ;  $n = 1, 2, 3 \dots$ , при которых возникает стоячая волна, называются собственными частотами воздушного столба. При этих частотах амплитуда колебаний резко возрастает и, следовательно, возрастает интенсивность звука; наблюдается явление резонанса, т. е. совпадение частоты источника колебаний и собственной частоты колебаний воздушного столба.

Явление резонанса использовано в работе для определения скорости звука. Поместим телефон над стеклянной трубкой и будем возбуждать в нем колебания частоты  $\nu$  при помощи звукового генератора. Начнем увеличивать длину воздушного столба от минимально возможной длины. Зафиксируем по линейке длину  $l_1$ , при которой услышим первое усиление интенсивности звука. Это означает, что мы наблюдаем явление резонанса, а на длине  $l_1$

образовалась стоячая волна:  $l_1 = \frac{1}{4} \lambda$  (см. формулу (6) при  $n=0$ ). Продолжим увеличение длины воздушного столба. Следующее усиление звука произойдет при длине  $l_2 = \frac{3}{4} \lambda$ . Следовательно,  $l_2 - l_1 = \frac{1}{2} \lambda$ , а если на длине  $l_m$  мы наблюдали  $m$  раз усиление звука, то

$$l_m - l_1 = (m - 1) \frac{\lambda}{2}. \quad (7)$$

Вычислив отсюда длину волны  $\lambda$ , соответствующую частоте  $\nu$ , найдем, что скорость звука

$$v = \nu \lambda. \quad (8)$$

### ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

1. Включить звуковой генератор в сеть переменного тока 220 В, дать ему прогреться 2—3 мин.

2. Установить произвольную частоту звукового генератора вращением рукоятки «Частота» в пределах от 800 до 2500 Гц.

3. Поворотом рукоятки «Амплитуда» установить уровень звучания телефона.

4. Поднять сосуд с водой так, чтобы уровень воды в трубке был на 2—3 см ниже телефона, и медленно опускать уровень воды в трубке.

5. Зафиксировать по линейке положение уровня воды, соответствующее самому первому усилению звука.

6. Продолжать понижение уровня воды. Найти самое низкое положение уровня воды, при котором наблюдается резонанс. Подсчитать число  $m$  всех усилений звука.

7. Результаты измерений и вычислений заносить в таблицу.

8. Измерения провести при 5 частотах в интервале от 800 до 2500 Гц.

Номер опыта	$\nu$ , Гц	$l_1$ , мм	$l_m$ , мм	$m$	$l_m - l_1$ , мм	$\lambda$ , м	$v$ , м/с
1							
2							
3							
4							
5							

## ПОРЯДОК ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. Вычислить длину воздушного столба  $l_m \rightarrow l_1$ , длину волны звука (формула (7)), записать их в таблицу.

2. Вычислить скорость звука по формуле (8) и его среднее значение  $\bar{v}$  из пяти опытов.

3. Определить доверительный интервал  $\Delta v_{гр}$  полученного среднего значения при доверительной вероятности  $\alpha = 0,95$ .

4. Сравнить полученное значение скорости звука с рассчитанным по формуле (1)  $v_{теор}$ .

5. Окончательный результат записать в виде

$$v = \bar{v} \pm \Delta v_{гр}$$
$$r = \frac{\Delta v_{гр}}{\bar{v}} \cdot 100\%$$
$$v_{теор} = \dots$$

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ:

*при допуске к работе*

1. Запишите уравнение плоской гармонической волны, распространяющейся в направлении оси  $+OX$  и  $-OX$ .

2. Какой колебательный процесс называется стоячей волной?

3. Дайте определение пучности, узла стоячей волны.

4. Каково соотношение между частотой, длиной волны и скоростью волны?

5. Нарисуйте схему установки, используемую в работе.

6. Как используется явление резонанса в работе? Как вы определите наличие резонанса в воздушном столбе?

*при отчете о работе*

1. Что представляют собой звуковые волны?

2. Опишите метод измерения скорости звука, применяемый в работе.

3. Чем можно объяснить расхождение в скорости звука, полученные в опытах на разных частотах.

4. Рассчитайте скорость звука при  $0^\circ\text{C}$ .

5. В чем состоит явление резонанса?

### ЛИТЕРАТУРА

1. Савельев И. В. Курс общей физики. — М.: Наука, 1978. т. 2, 180 с.
2. Руководство к лабораторным работам по физике / Под ред. Л. П. Гольдмана. — М.: Наука, 1973, 688 с.