

## Лабораторна робота № 18

### ВИЗНАЧЕННЯ ШВИДКОСТІ ЗВУКА У ПОВІТРІ

**Мета роботи:** вивчення властивостей стоячих хвиль та визначення швидкості звуку в повітрі.

**Прилади й матеріали:** лабораторна установка для визначення швидкості звуку у повітрі, лінійка.

#### Теоретичні відомості

Звук – це коливальний рух частинок пружного середовища, що поширюється у вигляді пружних хвиль у газах, рідинах або твердих середовищах. Людина сприймає звук в діапазоні частот від 16 Гц до 20000 Гц. У цьому розумінні існує більш вузьке визначення звуку як явища, що сприймається людиною. При цьому існують об'єктивні та суб'єктивні характеристики звуку.

Найважливіші об'єктивні характеристики звуку – швидкість поширення  $v$ , частота  $f$  та звуковий тиск  $p$ . Суб'єктивні характеристики звуку – висота, тембр та гучність. Висота звуку пов'язана з частотою коливань: чим більша частота, тим вищий звук. Тембр звуку – це якісна характеристика кожного джерела звуку, що допомагає розрізняти джерела, наприклад, різні голоси людей. Гучність пов'язана із звуковим тиском: чим більшим є звуковий тиск, тим більшою є гучність.

В даній роботі потрібно визначити швидкість поширення звуку в повітрі. Швидкість звуку в пружному твердотільному середовищі визначається співвідношенням:

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (1)$$

де  $E$  – модуль пружності середовища,  $\rho$  – густина його. Оскільки повітря характеризується пружністю тільки при стисканні, то в повітрі може існувати лише повздовжня звукова хвиля. У твердих речовинах, наприклад металах, можуть існувати як повздовжні, так і поперечні хвилі, тобто в формулу (1) треба підставляти відповідний модуль пружності.

В даній роботі швидкість звуку в повітрі визначається методом стоячих хвиль. Стояча хвиля – це результат інтерференції (накладання) двох когерентних хвиль однакової частоти, довжини та амплітуди, що поширюються в протилежних напрямках. В реальності це відбувається при відбиванні хвиль від перешкод.

Хвильовий рух являє собою різновид механічного руху, що полягає в поширенні механічних коливань у просторі з часом. Закон поширення хвиль має вигляд:

$$y_1 = y_1(t, x) = A_m \cos(\omega t - kx + \varphi_0), \quad (2)$$

де  $A_m$  – амплітуда хвилі, що дорівнює амплітуді відповідних механічних коливань;

$\cos(\omega t - kx + \varphi_0)$  – фазовий множник;

$(\omega t - kx + \varphi_0)$  – фаза хвилі;

$\varphi_0$  – початкова фаза;

$k = 2\pi / \lambda$  – хвильове число;

$\omega$  – циклічна частота коливань з довжиною хвилі  $\lambda$ , періодом  $T$ ., частотою  $f$ :

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f .$$

Очевидно, вираз для швидкості  $v$  поширення хвиль при цьому може бути записаний як:

$$v = \frac{\lambda}{T} = \frac{\omega}{k} .$$

Закон поширення відбитої хвилі має вигляд:

$$y_2 = y_2(t, x) = A_m \cos(\omega t + kx + \varphi_0). \quad (3)$$

Суперпозиція хвиль (2) та (3) описується як:

$$\begin{aligned} y_1 + y_2 &= A_m [\cos(\omega t - kx + \varphi_0) + \cos(\omega t + kx + \varphi_0)], \\ y_1 + y_2 &= 2A_m \cos(kx) \cos(\omega t + \varphi_0), \end{aligned} \quad (4)$$

або (якщо  $\varphi_0 = 0$ )

$$y = y(t, x) = y_1 + y_2 = 2A_m \cos(kx) \cos(\omega t), \quad (5)$$

де  $2A_m \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}x\right)$  являє собою амплітуду стоячої хвилі. Як бачимо, амплітуда стоячої хвилі вдвічі більша, ніж амплітуди хвиль, що падає та відбивається. У точках, де

$$\frac{2\pi}{\lambda}x = \pm k\pi, \quad (k = 0, 1, 2, \dots), \quad (6)$$

амплітуда коливань досягає найбільшого значення  $2A_m$ . Ці точки називаються пучностями стоячої хвилі. Координати пучностей

$$x_{\text{п}} = \pm k \frac{\lambda}{2}, \quad (k = 0, 1, 2, \dots). \quad (7)$$

У точках, де

$$\frac{2\pi}{\lambda}x = \pm \left(k + \frac{1}{2}\right)\pi, \quad (k = 0, 1, 2, \dots), \quad (8)$$

амплітуда коливань дорівнює нулю. Ці точки називаються вузлами стоячої хвилі. Координати вузлів:

$$x_{\text{в}} = \pm \left(k + \frac{1}{2}\right) \frac{\lambda}{2}, \quad (k = 0, 1, 2, \dots). \quad (9)$$

Таким чином відстань між найближчими вузлами та найближчими пучностями дорівнює  $\lambda/2$ .

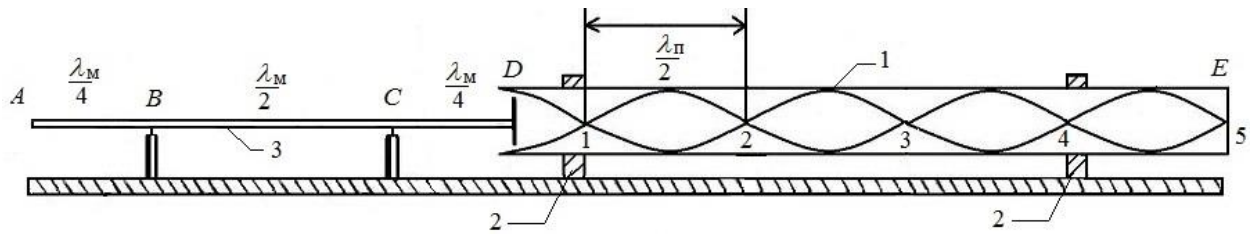


Рисунок 1. Лабораторна установка.

Установка для визначення швидкості звуку в повітрі зображена на рисунку 1. Вона містить закрити з одного боку і відкрити з другого боку скляну трубку 1, заповнену порошком з корки. Трубку можна переміщати в горизонтальному напрямі на опорах 2. Біля відкритого кінця трубки встановлено виготовлений з латуні стержень 3, який закріплений в опорах. До установки додається ганчірка та порошок каніфолі. Якщо ганчірку з порошком каніфолі щільно притиснути до стержня і протягнути вздовж нього, то в стержні виникнуть механічні коливання з довжиною хвилі, що дорівнює довжині стержня, тобто  $\lambda_{\text{л}} = AD$ . Оскільки кінець стержня  $D$  розміщується поблизу відкритої трубки, то в ній також виникнуть звукові хвилі довжиною  $\lambda_{\text{п}}$ . Довжина цих хвиль менша, ніж в латуні, і вздовж трубки може розміститися декілька хвиль ( $4 \div 6$ ). Якщо відстань між стержнем і закритим кінцем трубки відповідає умові існування стоячих хвиль, то порошок корки почне рухатися, утворюючи картину стоячих хвиль (рисунок 2). Таким чином ми маємо змогу "побачити" стоячу хвилю і виміряти її довжину.

При цьому частота звука у повітрі  $f_{\text{п}} = \nu_{\text{п}}/\lambda_{\text{п}}$  дорівнює частоті звука у металі  $f_{\text{л}} = \nu_{\text{л}}/\lambda_{\text{л}}$ , а довжина хвиль,  $\lambda_{\text{п}}$  і  $\lambda_{\text{л}}$ , та швидкості поширення звуку,  $\nu_{\text{п}}$  і  $\nu_{\text{л}}$ , у повітрі та металі різняться, тобто

$$f_{\text{п}} = f_{\text{л}} = \frac{\nu_{\text{п}}}{\lambda_{\text{п}}} = \frac{\nu_{\text{л}}}{\lambda_{\text{л}}} \quad \Rightarrow \quad \nu_{\text{п}} = \frac{\lambda_{\text{п}}}{\lambda_{\text{л}}} \nu_{\text{л}}. \quad (10)$$

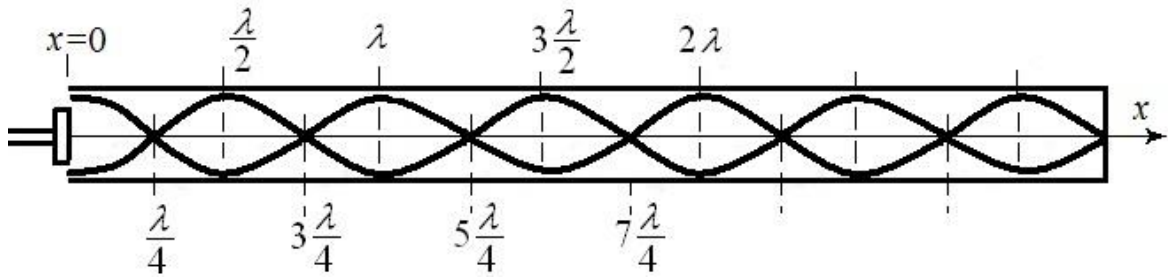


Рисунок 2. Стояча хвиля в скляній колбі.

Для визначення довжини звукової хвилі у повітрі необхідно визначити відстань  $l_{12}$  між двома сусідніми вузлами (пучностями); або відстань  $l_{13}$  між трьома сусідніми вузлами; або відстань  $l_{14}$  між чотирма сусідніми вузлами; або відстань  $l_{15}$  між п'ятьма сусідніми вузлами і т.д. Структуру звукової хвилі в Тоді довжину хвилі можна оцінити виразами

$$\lambda_{п1} = 2l_{12}, \quad \lambda_{п2} = l_{13}, \quad \lambda_{п3} = 2l_{14}/3, \quad \lambda_{п4} = l_{15}/2, \dots \quad (11)$$

де середнє значення довжини хвилі буде рівним

$$\langle \lambda_{п} \rangle = \frac{\lambda_{п1} + \lambda_{п2} + \lambda_{п3} + \lambda_{п4}}{4}. \quad (12)$$

Підставивши ці значення в формулу (10), урахувуючи (1), одержимо швидкість звука в повітрі:

$$v_{п} = \frac{\langle \lambda_{п} \rangle}{\lambda_{л}} \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho}}. \quad (13)$$

### Послідовність виконання роботи

1. Відсунути трубку так, щоб її відкритий бік знаходився поблизу кінця стержня  $D$ , та обернути скляну трубку навколо осі, щоб порошок корки рівномірно розподілився вдовж трубки.
2. Виміряти довжину латунного стержня визначити довжину звукової хвилі в металі:  $\lambda_{л} = AD$ .

3. Ганчіркою з каніфоллю декілька разів провести вздовж стержня, при цьому повільно переміщуючи трубку в бік стержня, доки не з'явиться картина стоячих хвиль.
4. Виміряти відстані  $l_{12}$ ,  $l_{13}$ ,  $l_{14}$ , і  $l_{15}$  між двома, трьома, чотирма і п'ятьма сусідніми вузлами (або пучностями), відповідно. Дані вимірювань внести в таблицю 1.
5. За допомогою формул (11) і (12) визначити середнє значення звукової хвилі в повітрі.
6. По формулі (13) розрахувати швидкість звука в повітрі.
7. Порівняти одержане значення з табличним:

$$v_T = 342,4 \frac{\text{М}}{\text{с}} \text{ при } 20^\circ \text{С.}$$

8. Обчислити відносну та абсолютну похибки.

### Звіт за виконану роботу

1. Робоча формула:

$$v_{\text{п}} = \frac{\langle \lambda_{\text{п}} \rangle}{\lambda_{\text{л}}} \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho}} - \text{швидкість звука в повітрі.}$$

- 1.1. Величини, що вимірюються:

$n = 2, 3, 4, 5$  – кількість сусідніх вузлів,  $[n] = 1$ .

$l_{1n}$  – відстань між  $n$  сусідніми вузлами стоячої хвилі,

$$[l_{1n}] = \text{м}; \quad \Delta l_{1n} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

$l_{\text{л}}$  – довжина латунного стержня,  $[l_{\text{л}}] = \text{м}; \quad \Delta l_{\text{л}} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$

- 1.2. Табличні величини:

$$E = 10,3 \cdot 10^{10} \frac{\text{Н}}{\text{м}^2},$$

$$\rho = 8,5 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3},$$

$$v_T = 342,4 \frac{\text{М}}{\text{с}},$$

1.3. Величини, що обчислюються:

$$v_{\text{п}} - \text{швидкість звуку}; [v_{\text{п}}] = \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

2. Результати експерименту (таблиця 1):

Таблиця 1

N	$l_{\text{п}} = \lambda_{\text{п}}, \text{ м}$	$n$	$l_{1n}, \text{ м}$	$\lambda_{\text{п}}, \text{ м}$
1		2		$\lambda_{\text{п1}} =$
2		3		$\lambda_{\text{п2}} =$
3		4		$\lambda_{\text{п3}} =$
4		5		$\lambda_{\text{п4}} =$

Середнє значення довжини хвилі в повітрі:

$$\langle \lambda_{\text{п}} \rangle = \frac{\lambda_{\text{п1}} + \lambda_{\text{п2}} + \lambda_{\text{п3}} + \lambda_{\text{п4}}}{4} =$$

3. Обробка результатів експерименту:

3.1. Швидкість звуку в повітрі:

$$v_{\text{п}} = \frac{\langle \lambda_{\text{п}} \rangle}{\lambda_{\text{п}}} \cdot \sqrt{\frac{10,3 \cdot 10^{10} \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}}{8,5 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}}} =$$

4. Висновки:

### Контрольні питання

1. Що таке стояча хвиля? За яких умов вона існує?
2. Записати рівняння стоячої хвилі та пояснити усі параметри в цьому рівнянні.
3. Які хвилі можуть існувати в газах? В твердих тілах? В рідинах?
4. Вивести робочу формулу для обчислення швидкості звуку в повітрі.

5. Вивести робочу формулу для обчислення похибок.
6. Неточність визначення якої величини найбільш впливає на похибку визначення швидкості звуку? Як можна зменшити цю похибку?
7. Як можна збудити хвилю в пружному середовищі?
8. Які параметри хвилі змінюються при переході з одного середовища в інше?
9. Які характеристики звуку є об'єктивними, а які – суб'єктивними?
10. Графічно зобразити розподіл амплітуди вдовж стоячої хвилі.