Wyznaczanie prędkości rozchodzenia się dźwięku w powietrzu i w ciele stałym

Obowiązkowa znajomość zagadnień:

Podstawowe wiadomości o ruchu falowym: prędkość, amplituda, okres i częstość; ruch harmoniczny, fala stojąca, równanie fali, wielkości charakteryzujące fale dźwiękowe, w którym z ośrodków (ciała stałe, ciecze, gazy) prędkość dźwięku jest największa?

Zadania do wykonania

I. Poznanie podstaw teoretycznych propagacji i superpozycji fal mechanicznych.
II. Wykonanie pomiarów długości fali.
III. Zestawienie wyników i obliczenie prędkości rozchodzenia się dźwięku w powietrzu i w ciele stałym.

Wiadomości wprowadzające

W ośrodkach sprężystych wytrącenie pewnego obszaru z położenia równowagi powoduje drgania wokół tego położenia. Gdy ciałem drgającym jest pewna część jednorodnego ośrodka, wtedy tracona energia nie jest rozpraszana bezładnie (pamiętajmy, że drgające ciało przekazuje część swojej energii otoczeniu) lecz wprawia w ruch drgający sąsiadujące części ośrodka, dzięki czemu drgania przenoszą się w przestrzeni i w czasie. Takie przenoszenie drgań w przestrzeni i w czasie nazywamy **falą**.
W najprostszym przypadku jest to drganie harmoniczne, w którym wychylenie z położenia równowagi zmienia się w czasie następująco:

$$A(t) = A_0 \cos \omega t \tag{1}$$

gdzie: $\boldsymbol{A_0}$ – amplituda drgań (największe wychylenie);
$\omega = \frac{2\pi}{T}$ – częstotliwość kątowa;
T – okres drgań.

Wskutek sprężystości ośrodka zaburzenie to przenosi się do coraz dalszych obszarów z prędkością $\boldsymbol{v}$ zależną od właściwości danego ośrodka. Zjawisko to nazywamy falą mechaniczną.

W punkcie oddalonym od źródła zaburzenia o $\boldsymbol{x}$ drgania pojawiają się z opóźnieniem $\boldsymbol{t}$. Ogólnie dla wszystkich punktów $\boldsymbol{x}$ drgającego ośrodka możemy zapisać:

$$A(t,x) = A_0 \cos \omega \left(t \mp \frac{x}{v}\right) \tag{2}$$

Równanie opisuje falę rozchodzącą się w kierunku dodatniej osi x – znak minus we wzorze (2), w przypadku rozchodzenia się fali w kierunku przeciwnym we wzorze (2) znak plus.

Długością fali nazywamy najmniejszą odległość między punktami drgającymi w jednakowych fazach. Jest ona równa drodze jaką określona faza przebędzie z prędkością $\boldsymbol{v}$ w czasie $\boldsymbol{T}$:

$$\lambda = v \cdot T \tag{3}$$

stąd:

$$v = \lambda \cdot f \tag{4}$$

gdzie: $\boldsymbol{\lambda}$ – długość fali;

$\boldsymbol{f} = \frac{\mathbf{1}}{\boldsymbol{T}}$ – częstotliwość rozchodzenia drgań fali;

$\boldsymbol{v}$ – prędkość dźwięku w danym ośrodku.

<u>Jest to wzór słuszny dla każdego typu fali.</u>

Powierzchnię utworzoną przez punkty, do których doszło w danej chwili zaburzenie nazywamy czołem fali. Fale mogą więc być płaskie (w przypadku gdy fala rozchodzi się w jednym kierunku), kuliste (gdy źródło wysyła energię drgania tak samo we wszystkich kierunkach).

W zależności od kierunku drgań cząsteczek ośrodka względem kierunku rozchodzenia się fali, fale mogą być **podłużne** – cząstki drgają równolegle, lub **poprzeczne** – cząstki drgają prostopadle do kierunku propagacji (czyli rozchodzenia się) fali. Fale poprzeczne powstają w ośrodkach charakteryzujących się sprężystością postaci (sztywnością). Dla występowania fal podłużnych wystarczający jest warunek sprężystości objętości. W cieczach i gazach mogą rozchodzić się tylko fale podłużne. W ciałach stałych mogą występować również fale poprzeczne.

Dźwięk (fala akustyczna) to fala podłużna, czyli rozchodzące się rozrzedzenia i zagęszczenia powietrza. Zmiana ciśnienia $\boldsymbol{\Delta p}$ ma również charakter harmoniczny. Falę akustyczną można więc traktować jak falę przemieszczeń lub jak falę zmian ciśnień.

Interferencja fal, fala stojąca

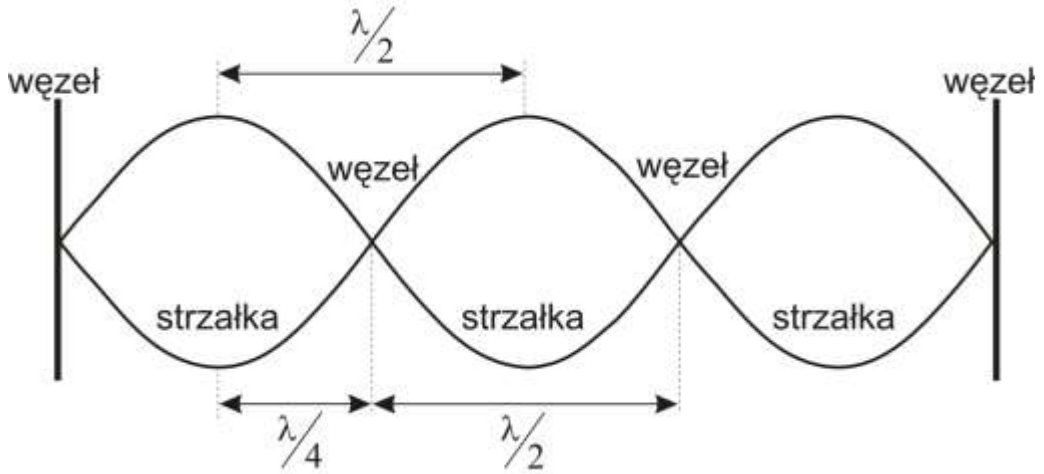
Przez ten sam obszar przestrzeni mogą przebiegać niezależnie od siebie dwie (lub więcej) fale. Przemieszczenie cząstki ośrodka jest wtedy sumą przemieszczeń, jakie wywoływałyby poszczególne fale. Proces takiego

dodawania przemieszczeń nazywamy **superpozycją fal**. Fizyczne zjawiska nakładania się dwóch lub więcej ciągów falowych określane są mianem **interferencji fal**. Fala wypadkowa ma tę samą częstość co fale składowe, lecz inną amplitudę. Jeżeli fale mają wszędzie takie same fazy, to amplituda fali wypadkowej jest dwa razy większa niż amplitudy fal składowych. Gdy spotykają się „szczyty" i „doliny" fal, następuje interferencja konstruktywna, czyli wzmocnienie fal. W przypadku gdy fazy fal różnią się o π/2 (lub nieparzystej wielokrotności π/2), to „szczyt" jednej fali spotyka się z „doliną" drugiej, następuje wygaszenie i mamy do czynienia z interferencją destruktywną.

Jeśli fale rozchodzą się w ośrodku o skończonych rozmiarach, to odbijają się one od granic takiego ośrodka, a po odbiciu poruszają się w kierunku przeciwnym niż fale padające, lecz posiadają w dalszym ciągu te same amplitudy i częstości co fale padające. Zgodnie z zasadą superpozycji fala padająca i odbita dodają się do siebie a powstała fala nosi nazwę **fali stojącej**, w której amplituda drgań cząstek ośrodka zależy od ich położenia w przestrzeni (nie jest taka sama dla wszystkich cząstek drgającego ośrodka) i dana jest wzorem:

$$A(x) = 2A_0 \cos\left(2\pi \frac{x}{\lambda}\right) \tag{5}$$

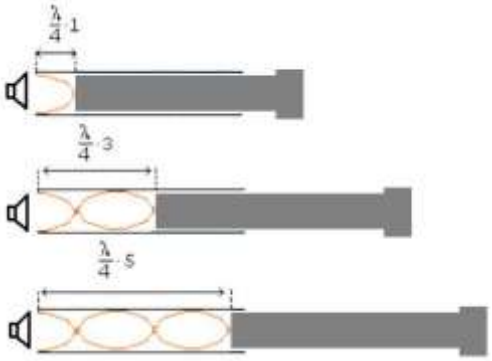
Amplituda przyjmuje wartość maksymalną w punktach, dla których $x = n\frac{\lambda}{2}$, (gdzie: n = 0, ±1, ±2..) nazywamy je **strzałkami fali**, a odległość między nimi jest równa połowie długości fali, czyli $\frac{\lambda}{2}$. Wartość amplitudy spada do zera w punktach, dla których: $x = \left(n + \frac{1}{2}\right)\frac{\lambda}{2}$, (gdzie: n = 0, ±1, ±2..) nazywamy je **węzłami fali**. Odległość pomiędzy dwoma sąsiednimi węzłami fali wynosi również połowę długości fali $\left(\frac{\lambda}{2}\right)$, natomiast pomiędzy sąsiednim węzłem i strzałką fali ćwierć długości fali $\left(\frac{\lambda}{4}\right)$ (rys. 1).



Rys. 1. Obwiednia fali stojącej przedstawiająca obraz węzłów i strzałek.

Rezonans akustyczny

Ze zjawiskiem rezonansu akustycznego mamy do czynienia wtedy, gdy dla jakiegoś źródła fali dźwiękowej jego częstotliwość jest ściśle dopasowana z częstotliwością drgań własnych ciała, do którego dociera fala dźwiękowa. Dzieje się tak, gdyż fala dźwiękowa będąca falą podłużną powoduje miejscowe i periodyczne zmiany ciśnienia ośrodka sprężystego, w którym się porusza (powietrza). Takie zmiany ciśnienia powietrza powodują pobudzenie (wymuszenie) drgań ciała. Dla słupa powietrza znajdującego się w rurze o długości ***l*** dochodzi do zjawiska rezonansu akustycznego wtedy, gdy częstość źródła dźwięku pozostaje w rezonansie ze słupem powietrza. Dla najmniejszej wysokości słupa powietrza, dla której obserwujemy rezonans, na powierzchni tłoka w rurze powstaje węzeł drgań, a w otwartym końcu rury strzałka (rys. 2). Przy większych wysokościach słupa rezonans będzie zachodził, gdy ***l*** odpowiada kolejno wartościom $(2n+1)\frac{\lambda}{4}$, (gdzie: n = 0, 1, 2..).



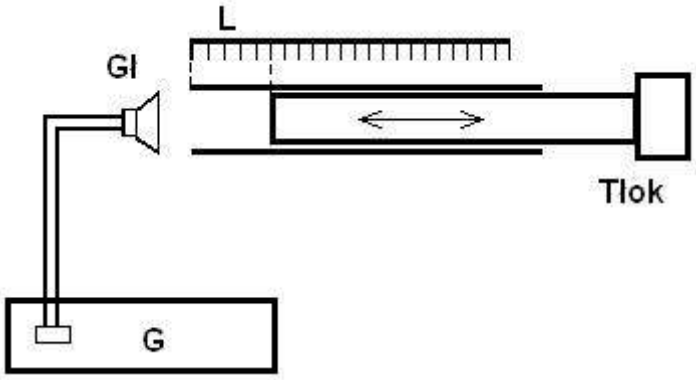
Rys.2 Położenie węzłów i strzałek fali stojącej wzbudzonej w jednostronnie otwartej rurze.

Wyznaczanie prędkości rozchodzenia się dźwięku w powietrzu przy pomocy rury Quinckego

Układ pomiarowy

Do pomiaru prędkości dźwięku wykorzystujemy tzw. rurę Quinckego, czyli rurę szklana otwartą z jednej strony, z drugiej strony znajduje się przesuwny tłok. Przy pomocy głośnika **Gł** emitujący drgania uzyskane z generatora drgań akustycznych **G** (drgania o częstotliwościach odpowiadających częstotliwościom

zakresu fal słyszalnych przez ucho ludzkie, a więc od ok. 20Hz do ok. 20kHz) (rys.3) umieszczonego u wlotu rury wprowadzamy fale dźwiękową do jej wnętrza. Po odbiciu od powierzchni przesuwnego tłoka fala interferuje z tą biegnącą z głośnika i przy odpowiednim ustawieniu tłoka otrzymujemy fale stojącą. Dzieje się to wówczas, gdy przy otwartym końcu rury powstaje strzałka, a na powierzchni tłoka tworzy się węzeł (rys.2). Słychać wówczas wzmocnienie dźwięku – słup powietrza w rurze drga z częstością drgań membrany głośnika (rezonans akustyczny). Słup powietrza w rurze zawiera wtedy nieparzystą liczbę ćwiartek fal, a różnica poziomów ustawienia tłoka, przy których występuję rezonans jest równa połowie długości fali $\left(\frac{\lambda}{2}\right)$ (patrz rys.2).



Rys. 3. Stanowisko z rurą Quinckego.

Odnajdując dwa sąsiednie takie ustawienia tłoka (***L₁*** i ***L₂***) dla których występuje rezonans, możemy łatwo wyznaczyć długość fali a tym samych dla znanej częstotliwości prędkość dźwięku w powietrzu.

Wykonanie ćwiczenia i opracowanie wyników:

1. Włączamy generator akustyczny; wybieramy częstotliwość ***f*** = 3000 Hz.
2. Wysuwamy tłok ze szklanej rury, dobierając taką wysokość słupa powietrza, dla której wystąpi pierwszy węzeł fali stojącej czyli słyszymy największe osłabienie fali dźwiękowej.
3. Czynność powyższą powtarzamy trzykrotnie, zapisując za każdym razem odczytaną z podziałki wartość $\boldsymbol{L_1}$. następnie obliczamy wartość średnią $\overline{L_1}$.
4. Wysuwamy tłok ze szklanej rury, i szukamy położenia drugiego węzła; trzykrotnie czynność tę powtarzamy i zapisujemy wartość $\boldsymbol{L_2}$ i obliczamy wartość średnią $\overline{L_2}$.
5. Powtarzamy pomiary dla częstotliwości 2600Hz, 2000Hz i 1500Hz.

   Otrzymane pomiary zapisujemy w tabeli 1.

Tabela 1. Tabela pomiarowa do wyznaczenie prędkości dźwięku w powietrzu.

f [Hz]	L_1 [m]	$\overline{L_1}$ [m]	L_2 [m]	$\overline{L_2}$ [m]	λ [m]	v [m/s]
3000						
2600						
2000						
1500						
Średnia prędkość rozchodzenia się dźwięku w powietrzu [m/s]						

6. Obliczyć długość fali dla każdej częstotliwości z zależności:

$$\lambda = 2(\overline{L_2} - \overline{L_1})$$

7. Obliczamy prędkość rozchodzenia się dźwięku w powietrzu dla każdej częstotliwości ze wzoru:

$$v = \lambda \cdot f$$

A następnie obliczmy wartość średnią dla wszystkich częstotliwości.

8. Obliczyć wartość niepewności pomiarowej prędkości rozchodzenia się dźwięku w powietrzu dla każdej badanej częstotliwości, metodą różniczki zupełnej.

Chcąc ocenić niepewność wielkości y, która jest funkcją mierzonych wielkości $x_1, x_2, \ldots x_n$, czyli $y = f(x_1, x_2, \ldots x_n)$. Korzystając z rozwinięcia funkcji y w szereg Taylora wokół wartości będącej wynikiem pomiaru oraz zaniedbując wyrazy wyższego rzędu niż pierwszy i zastępując nieskończenie małe przyrosty zmiennych niezależnych wartościami przyrostów skończonych otrzymamy:

$$\Delta y = \left|\frac{\partial y}{\partial x_1}\right| \Delta x_1 + \left|\frac{\partial y}{\partial x_2}\right| \Delta x_2 + \cdots + \left|\frac{\partial y}{\partial x_n}\right| \Delta x_n$$

W przypadku obliczenia wartość niepewności pomiarowej prędkości rozchodzenia dźwięku w powietrzu wzór ten przyjmuje postać:

$$\Delta v = f \cdot \Delta\lambda + \lambda \cdot \Delta f$$

Gdzie:
$\Delta\lambda$ = 0,001m;
Δf = 1Hz.

9. Przedstawić wynik w postaci:

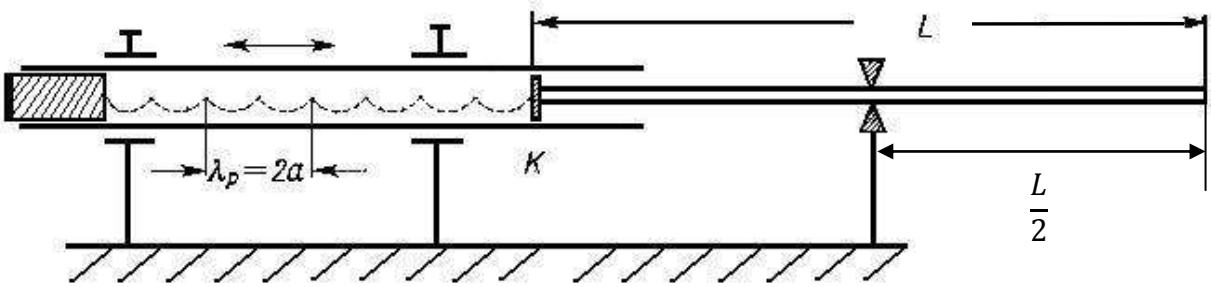
$$v \pm \Delta v$$

i porównać z wartością tablicową.

Wyznaczanie prędkości rozchodzenia się dźwięku w metalu przy pomocy rury Kundta.

Układ pomiarowy

Do wyznaczania prędkości fali dźwiękowej w pręcie metalowym wykorzystuje się szklaną rurę o długości około 1 m i średnicy około 4 cm, zwaną rurą Kundta (rys. 4). Jeden z końców rury jest zatknięty korkiem, przez drugi natomiast przechodzi pręt zakończony krążkiem. Średnica krążka jest nieco mniejsza od średnicy rury, aby pręt mógł swobodnie wykonywać drgania. Pręt umocowany jest w połowie swojej długości ***L***. Pobudzanie go do drgań osiąga się poprzez pocieranie szmatką. Wytworzona wewnątrz rury w powietrzu fala odbija się od drugiego jej końca zatkanego korkiem. W wyniku interferencji fali padającej i odbitej powstaje fala stojąca której węzły i strzałki ilustruje zachowanie nasypanego do rury proszku korkowego. W strzałkach, fali stojącej gromadzi się drobny proszek korkowy rozsypany na dnie rury.



Rys.4. Schemat rury Kundta.

Maksymalną amplitudę drgań słupa powietrza otrzymuje się w przypadku rezonansu który wywołujemy przesuwając odpowiednio koniec rury. Prędkość $\boldsymbol{v_x}$ rozchodzenia się dźwięku w pręcie metalowym obliczmy ze wzoru:

$$v_x = \frac{L}{a} \cdot v \cdot \sqrt{1 + \alpha \cdot T}$$

gdzie: ***L*** – długość pręta

a – odległość pomiędzy dwoma sąsiednimi węzłami (lub strzałkami)

v – prędkość rozchodzenia się dźwięku w powietrzu.

α – współczynnik rozszerzalności objętościowej powietrza, $\boldsymbol{\alpha}$ = 0.004 1/^{o}C

T – temperatura powietrza (w ^{o}C)

Wykonanie ćwiczenia i opracowanie wyników:

1. Wsypać i rozprowadzić równomiernie na dnie rury proszek korkowy.
2. Wyznaczamy długość ***L*** badanego pręta (z dokładnością do 0,001m) i mocujemy pręt w środku jego długości (rys.4).
3. Pobudzamy pręt do drgań poprzez pocieranie jego wolnego końca szmatką nawilżoną kalafonią (UWAGA!: decydujący wpływ na wytwarzanie drgań ma nie siła nacisku, ale umiejętność uchwytu – kciuk i palce musza obejmować pręt przez szmatkę).
4. W trakcie pocierania pręta przesuwać rurę szklaną, aby dobrać takie jej położenie, dla którego w rurze nastąpi rezonans słupa powietrza, proszek korkowy ułoży się w charakterystycznie w regularnych odstępach pokazując położenie węzłów i strzałek powstałej fali stojącej.
5. Wyznaczamy odległość ***A*** pomiędzy dwoma jak najdalszymi wyraźnymi węzłami i ustalamy liczbę ***n*** połówek długości fali odpowiadającej tej odległości.
6. Pięciokrotnie powtarzamy pomiar, a uzyskane wyniki zapisujemy w tabeli 2.
7. Odczytać temperaturę ***T*** otoczenia.
8. W obliczeniach prędkość rozchodzenia się dźwięku w powietrzu przyjąć równa średniej prędkości jaką uzyskano z pomiaru metoda rury Quinckego.
9. Obliczyć prędkość $\boldsymbol{v_x}$ rozchodzenia się dźwięku w pręcie metalowym.
10. Porównać wynik z danymi tablicowymi, <u>określić rodzaj metalu z którego jest badany pręt.</u>

Tabela 2. Tabela pomiarowa do wyznaczenie prędkości dźwięku w metalu.

L [m]	***A*** [m]	***n***	$\boldsymbol{a = \frac{\lambda}{2} = \frac{A}{n}}$ [m]	$\boldsymbol{a_{śr}}$ [m]	***T*** [^{o}C]	$\boldsymbol{v_x}$ [m/s]

Uniwersytet Rolniczy
Wydział Leśny
Katedra Mechanizacji Prac Leśnych
Laboratorium Fizyki – instrukcja do ćwiczeń
Rok akademicki 2012/2013