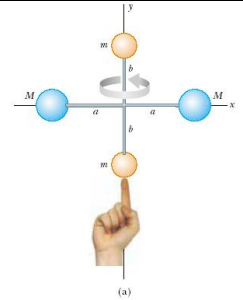


INSTYTUT FIZYKI

**WYDZIAŁ INŻYNIERII PRODUKCJI
I TECHNOLOGII MATERIAŁÓW
POLITECHNIKA CZĘSTOCHOWSKA**



**PRACOWNIA
MECHANIKI**



ĆWICZENIE NR M-7

***BADANIE CZĘSTOŚCI DRGAŃ WŁASNYCH
ORAZ WYZNACZANIE PRĘDKOŚCI DŹWIĘKU
W POWIETRZU ZA POMOCĄ RURY QUINCKEGO***

I. Zagadnienia do przestudiowania

1. Opis ruchu falowego, równanie fali, wielkości charakteryzujące ruch falowy.
2. Rozchodzenie się fal podłużnych.
3. Zasada superpozycji fal, interferencja fal, fale stojące.
4. Rezonans akustyczny.
5. Natężenie dźwięku.

II. Wprowadzenie teoretyczne

1. Opis ruchu falowego, równanie fali, wielkości charakteryzujące ruch falowy

Ruch falowy polega na rozchodzeniu się zaburzeń w ośrodku. Zaburzeniem tym mogą być drgania mechaniczne cząstek ośrodka (fale mechaniczne), drgania wektorów natężenia pola elektrycznego i indukcji magnetycznej (fale elektromagnetyczne). Fale mechaniczne rozchodzą się poprzez ośrodek dzięki jego sprężystości. Drgania przekazywane są kolejnym coraz dalszym częściom ośrodka.

Wyrażenie matematyczne opisujące zależność wychylenia drgającej cząstki od jej położenia w przestrzeni (x, y, z) oraz czasu t to równanie fali. Dla fali płaskiej, czyli takiej, w której punkty drgające w tej samej fazie tworzą płaszczyznę, rozchodzącej się w dowolnym kierunku, równanie fali ma postać:

$$\psi = A \cos(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r} + \delta) \quad (1)$$

gdzie: A - amplituda drgań, czyli największe wychylenie cząstki ze stanu równowagi, ω - częstość kołowa drgań, $\omega = \frac{2\pi}{T}$; T - okres drgań, czyli czas, w którym fala przebędzie odległość równą jednej długości fali, δ - faza początkowa drgań, $\vec{k} = [k_x, k_y, k_z]$ - wektor falowy, czyli wektor skierowany zgodnie z kierunkiem rozchodzenia się fali, którego długość nazywana jest liczbą falową i wynosi $|\vec{k}| = k = \frac{2\pi}{\lambda}$, λ - długość fali, czyli odległość pomiędzy dwoma najbliższymi punktami, w których fala ma tę samą fazę; $\vec{r} = [x, y, z]$ - wektor wodzący punktu w przestrzeni.

2. Rozchodzenie się fal podłużnych

W zależności od kierunku drgań w stosunku do kierunku rozchodzenia się fali, czyli zaburzenia, fale można podzielić na podłużne i poprzeczne. Fale poprzeczne to takie, w których drgania odbywają się w kierunku prostopadłym do kierunku rozchodzenia się zaburzenia, natomiast z falami podłużnymi mamy do czynienia, gdy drgania zachodzą równoległe do kierunku rozchodzenia się fali. Przykładem mechanicznych fal podłużnych są fale dźwiękowe, czyli fale o częstotliwościach wywołujących w mózgu ludzkim wrażenie słyszenia. Rozchodzą się one zarówno w gazach, cieczach, jak i ciałach stałych. Dla

Ćwiczenie M-7: Badanie częstości drgań własnych oraz wyznaczanie prędkości dźwięku w powietrzu za pomocą rury Quinckego

człowieka zakres słyszalnych częstotliwości przy- pada na 20÷20 000 Hz, jednakże natężenie dźwięku musi być większe od pewnej wartości minimalnej zwanej progiem czułości i mniejsze od maksimum zwanego progiem bólu. Zarówno próg czułości, jak i próg bólu zależą od częstotliwości danego dźwięku. Ucho ludzkie jest najczulsze na fale dźwiękowe o częstotliwościach zawierających się w przedziale 800÷3000 Hz. Podłużne fale mechaniczne o częstotliwościach niższych od 20 Hz nazywamy falami infradźwiękowymi (poddźwiękowymi), natomiast fale o częstotliwościach wyższych od 20 kHz ultradźwiękowymi.

Proces rozchodzenia się fali dźwiękowej, której źródłem może być drgająca struna, słup powietrza lub membrana polega na naprzemiennym zagęszczaniu i rozrzedzaniu otaczającego powietrza (lub innego ośrodka). Cząsteczki ośrodka, oddziałując ze swym najbliższym otoczeniem, przenoszą fale na duże odległości od źródła.

Prędkość rozchodzenia się mechanicznych fal podłużnych można opisać wzorem

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}} \quad (2)$$

gdzie: B - moduł sprężystości objętościowej (moduł ściśliwości), zdefiniowanej wzorem: $B = -\frac{V\Delta p}{\Delta V}$

(V - objętość ciała, ΔV - zmiana objętości ciała wywołana zmianą ciśnienia Δp), ρ - gęstość ciała.

Prędkość rozchodzenia się fali jest więc zależna od właściwości ośrodka.

3. Zasada superpozycji fal, interferencja fal, fale stojące

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.

Rozważmy dwie fale rozchodzące się w kierunku dodatnim osi OX, posiadające tę samą prędkość i amplitudę, a różniące się fazą początkową:

$$\psi_1 = A \cos(\omega t - kx - \delta) \quad (3)$$

$$\psi_2 = A \cos(\omega t - kx) \quad (4)$$

Biorąc pod uwagę zasadę superpozycji, równanie fali wypadkowej będzie miało postać:

$$\psi = \psi_1 + \psi_2 = A[\cos(\omega t - kx - \delta) + \cos(\omega t - kx)] \quad (5)$$

i ostatecznie po przekształceniach

Ćwiczenie M-7: Badanie częstości drgań własnych oraz wyznaczenie prędkości dźwięku w powietrzu za pomocą rury Quinckego

$$\psi = 2A \cos \frac{\delta}{2} \cos \left(\omega t - kx - \frac{\delta}{2} \right) \quad (6)$$

Fala wypadkowa ma tę samą częstość co fale składowe, lecz inną amplitudę, równą $2A \cos \frac{\delta}{2}$. Jeśli δ jest równe zero lub wielokrotności 2π , obie fale mają wszędzie te same fazy, a amplituda fali wypadkowej jest dwa razy większa niż amplitudy fal składowych. Zarówno „szczyty”, jak i „doliny” fal spotykają się, następuje interferencja konstruktywna, czyli wzmocnienie fal. W przypadku gdy $\delta = \pi/2$ (lub nieparzystej wielokrotności $\pi/2$), „szczyt” jednej fali spotyka się z „doliną” drugiej, następuje wygaszenie i mamy do czynienia z interferencją destruktywną.

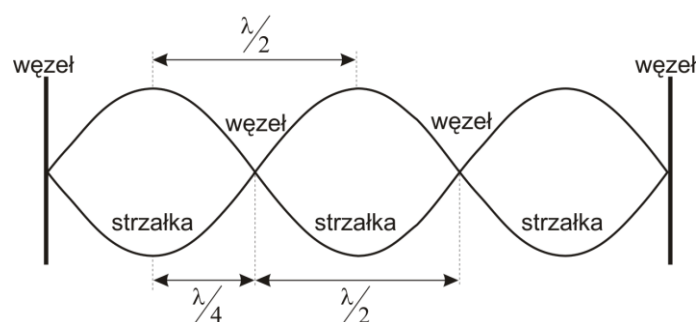
Jeśli fale rozchodzą się w ośrodku o skończonych rozmiarach, to odbijają się one od granic takiego ośrodka, a po odbiciu poruszają się w kierunku przeciwnym niż fale padające, lecz posiadają w dalszym ciągu te same amplitudy i częstości co fale padające. Zgodnie z zasadą superpozycji fala padająca i odbita dodają się do siebie. Jeśli fale te nie różnią się fazą początkową, to fala wypadkowa ma postać

$$\psi = \psi_1 + \psi_2 = A \cos(\omega t - kx) + A \cos(\omega t + kx) \quad (7)$$

co po przekształceniu daje wyrażenie

$$\psi = 2A \cos(kx) \cos(\omega t) = 2A \cos\left(2\pi \frac{x}{\lambda}\right) \cos(\omega t) = A(x) \cos(\omega t) \quad (8)$$

Równanie to przedstawia falę stojącą, czyli taką, w której amplituda drgań cząstek ośrodka zależy od ich położenia w przestrzeni (nie jest taka sama dla wszystkich cząstek drgającego ośrodka). Amplituda, dana wzorem $A(x) = 2A \cos\left(2\pi \frac{x}{\lambda}\right)$, przyjmuje wartość maksymalną w punktach, dla których $x = n \frac{\lambda}{2}$ ($n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$). Punkty te nazywamy strzałkami fali, a odległość między nimi jest równa połowie długości fali. Wartość amplitudy spada do zera w punktach, dla których $x = \left(n + \frac{1}{2}\right) \frac{\lambda}{2}$ ($n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$). Punkty te nazywamy węzłami fali. Odległość pomiędzy dwoma sąsiednimi węzłami fali wynosi połowę długości fali, natomiast pomiędzy sąsiednim węzłem i strzałką fali ćwierć długości fali (rys. 1).



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

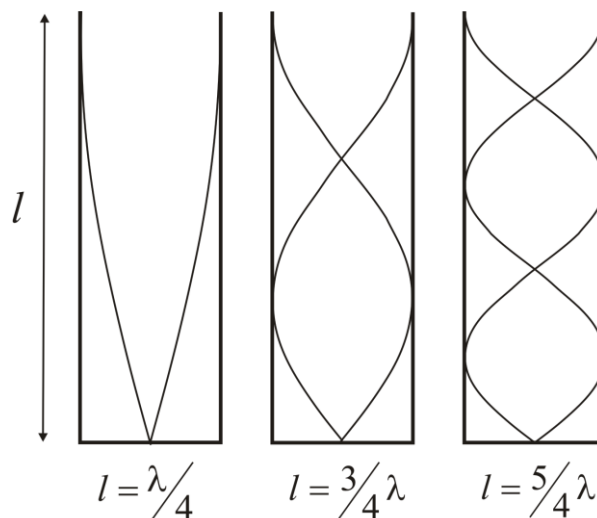
4. Rezonans akustyczny

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 wody 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 $\frac{(2n+1)\lambda}{4}$ ($n=0,1,2,\dots$). Jeśli wysokość słupa powietrza jest stała, a zmieniamy częstość źródła dźwięku, warunek powstania rezonansu ma postać

$$f_n = \frac{2n+1}{4l}v \quad (9)$$

gdzie: n - liczba naturalna, l - długość słupa powietrza, v - prędkość dźwięku w powietrzu.



Rys. 2. Położenie węzłów i strzałek fali stojącej wzbudzonej w jednostronnie otwartej rurze o długości l dla trzech różnych długości fali pozostających w rezonansie ze słupem powietrza

5. Natężenie dźwięku

Fala dźwiękowa biegnąca w ośrodku sprężystym niesie ze sobą pewną energię. Ilość energii przechodzącej przez jednostkową powierzchnię umieszczoną prostopadle do kierunku rozchodzenia się fali w jednostce czasu nazywamy natężeniem fali akustycznej I i opisujemy wyrażeniem

$$I = \frac{P}{S} \quad (10)$$

gdzie P to moc fali dźwiękowej padającej prostopadle na powierzchnię S .

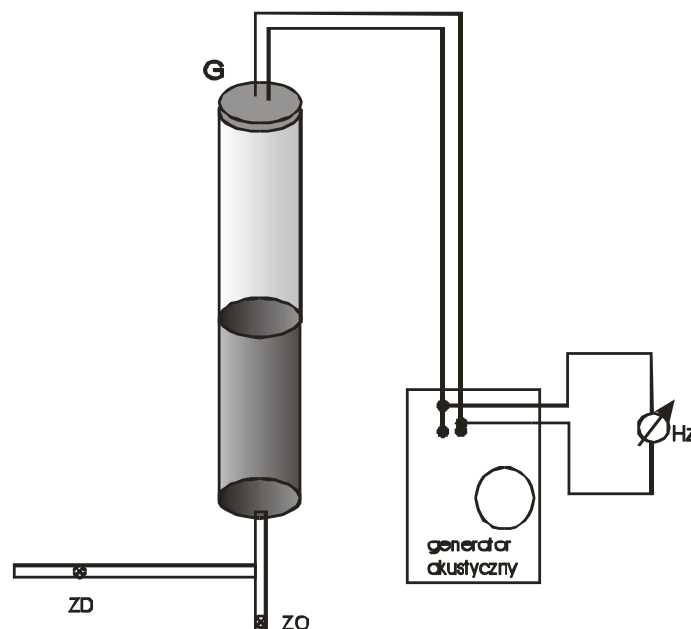
Natężenie najsłabszych dźwięków słyszalnych jest rzędu 10^{-12} W/m², natomiast natężenia dźwięków wywołujących ból wynoszą ok. $10 \div 10^2$ W/m². Ponieważ rozpiętość natężeń dźwięków słyszalnych jest bardzo duża, wprowadzono nową wielkość związaną z natężeniem, zwaną poziomem intensywności bądź poziomem głośności, opisaną wzorem

$$L = 10 \log \frac{I_x}{I_0} \quad (11)$$

gdzie I_x oznacza natężenie dźwięku, którego poziom intensywności chcemy określić, natomiast I_0 jest natężeniem przyjętym jako poziom odniesienia. Jednostką głośności jest *bel* [B], jednak w praktyce używa się najczęściej jednostek 10 razy mniejszych - *decybeli* [dB]. Cały przedział natężeń słyszalnych ($10^{-12} \div 10^2$ W/m²) odpowiada wartościom poziomu głośności od 0 do 130 dB.

III. Zestaw przyrządów

Rura Quinckego z zamontowanym głośnikiem i przyziarem milimetrowym, generator drgań akustycznych, miernik częstości



Rys. 3. Schemat układu pomiarowego: ZD - wodny zawór doprowadzający, ZO - wodny zawór odprowadzający, G - głośnik, Hz - miernik częstości

IV. Przebieg ćwiczenia

Pomiar prędkości dźwięku w powietrzu

1. Włączyć generator akustyczny (przełączyć pokrętkę z pozycji **WYŁ** do pozycji **WŁ SIEĆ**).
2. Podłączyć kabel pomiarowy (ze złączem BNC) do wejścia **B** licznika częstotliwości; włączyć licznik częstotliwości - wcisnąć przycisk **MAINS**; ustawić pokrętkę **DISPLAY TIME** na średnią wartość; włączyć przycisk **freq. A or B**; włączyć przełącznik **periods** na 10^7 ; oba pokrętki **LEVEL** przekręcić w pozycję **AUTO** (maksymalnie przeciwnie do ruchu wskazówek zegara).
3. Ustawić zakres generatora na 200 Hz÷2 kHz (położenie środkowe pokrętki zakresów).
4. Ustawić napięcie wyjściowe generatora na ok. 0,5 V przy zakresie napięcia 3 V.
5. Zamknąć wodny zawór odprowadzający na rurze Quinckego (czerwona rączka zaworu w pozycji prostopadłej do deski mocującej).
6. Powoli odkręcić zawór wodny kranu, ostrożnie napełniając rurę wodną aż do wysokości ok. 70 cm na podziałce centymetrowej przyklejonej do rury.
7. Ustawić wartość częstotliwości na generatorze w przedziale od 900 do 1500 Hz.
8. Nieznacznie otworzyć wodny zawór odprowadzający (czerwony), tak aby poziom wody powoli się obniżał.
9. Określić położenia dwu maksymalnych wzmocnień h_1 i h_2 fali dźwiękowej dla danej częstotliwości. Pomiar powtórzyć dwukrotnie.
10. Punkty od 5 do 8 powtórzyć dla innych trzech częstotliwości z zakresu od 90 do 150 Hz.
11. Pomiary zanotować w tabeli.

V. Tabela pomiarowa

f [Hz]	h_1 [m]	h_2 [m]	λ [m]	V [m/s]

UWAGA: *Po wykonaniu ćwiczenia otworzyć wodny zawór odprowadzający (czerwony)*

VI. Opracowanie wyników pomiarów

1. Obliczyć średnią długość fali dla każdej częstotliwości z zależności

$$h_2 - h_1 = \frac{\lambda}{2} \quad (12)$$

2. Obliczyć prędkość fali dźwiękowej dla poszczególnych wartości częstotliwości, stosując zależność

$$v = \lambda f \quad (13)$$

oraz jej wartość średnią.

3. Obliczyć wartości niepewności pomiarowych prędkości metodą różniczki zupełnej.
4. Przedstawić wyniki w postaci

$$v \pm \Delta v$$

UWAGA!!!

Po wykonaniu ćwiczenia otworzyć wodny zawór odprowadzający (czerwony).

Literatura

1. Dryński T., Ćwiczenia laboratoryjne z fizyki, PWN, Warszawa 1980.
2. Halliday D., Resnick R., Walker J., Fizyka, t. 2, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2003.
3. Herman M., Kalestyński A., Widkowski L., Podstawy fizyki dla kandydatów na wyższe uczelnie, PWN, Warszawa 1991.
4. Massalski J., Massalska M., Fizyka dla inżynierów, Fizyka klasyczna, Tom I, WNT, Warszawa 2005.
5. Matuła B., Akustyka, Skrypty Uczelniane Wydawnictwa Politechniki Śląskiej, Gliwice 1973.
6. Sawieliew I.W., Wykłady z fizyki, T. II, Elektryczność i magnetyzm, Fale, Optyka, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1994.
7. Sierański K., Jezierski K., Kołodka B., Fizyka, wzory i prawa z objaśnieniami, cz. I, Oficyna Wydawnicza Scripta, Wrocław 2005.
8. Szczeniowski S., Fizyka doświadczalna, cz. I, Mechanika i akustyka, PWN, Warszawa 1980.
9. Szydłowski H., Pracownia fizyczna wspomaganą komputerem, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2003.