Podstawy Fizyki Mechanika

Praca zbiorowa

Ćwiczenie F 9

BADANIE FAL AKUSTYCZNYCH

opr. techn. Mirosław Maś

Uniwersytet Przyrodniczo - Humanistyczny
Siedlce 2019

1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest wyznaczenie częstotliwości drgań kamertonu i membrany głośnika wykorzystując zjawisko rezonansu akustycznego.

Przed rozpoczęciem ćwiczenia należy sprawdzić czy zestaw laboratoryjny jest kompletny.

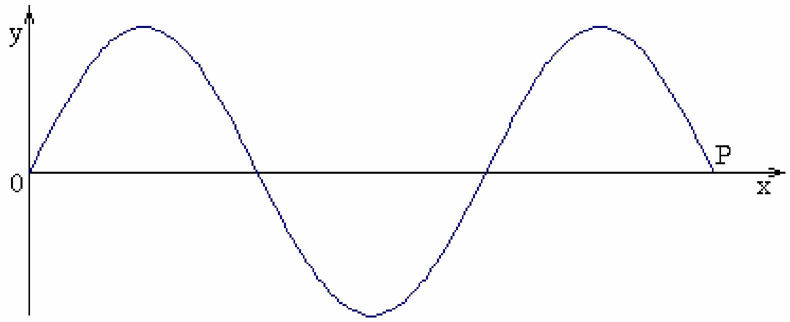
Do ćwiczenia należy opanować następujące zagadnienia teoretyczne:

- fala płaska i kulista,
- rozchodzenie się dźwięku w różnych ośrodkach,
- faza, powierzchnia falowa,
- rezonans akustyczny.

2. Wprowadzenie teoretyczne.

Fala

Rozchodzenie się zaburzeń elementów masy w jakimś ośrodku sprężystym nazywamy falą sprężystą. W każdym rzeczywistym ośrodku sprężystym cząsteczki powiązane są siłami międzycząsteczkowymi. Dzięki temu każda cząsteczka ma określone położenie równowagi trwałej. Wytrącenie z położenia równowagi wywołuje drganie cząsteczki wokół punktu równowagi wzdłuż odcinka lub krzywej zamkniętej. Pobudzona cząsteczka działa ze zmienną siłą na cząsteczki sąsiednie. Powodując ich drgania wymuszone. Wytrącenie z położenia równowagi jednej cząsteczki wywołuje ruch wymuszony innych cząsteczek. Zaburzenie równowagi rozprzestrzenia się w całym ośrodku. Załóżmy, że mamy do czynienia z ośrodkiem jednorodnym. Niech zaburzenie wywołane w ośrodku rozchodzi się wzdłuż prostej Ox.



Rys 9.1

Cząsteczka położona na początku układu współrzędnych w chwili t = 0 rozpoczyna drgania w kierunku osi Oy. Działa na nią siła skierowana do środka drgań. Jeżeli założymy, że jest ona proporcjonalna do wychylenia, wówczas drgania są drganiami harmonicznymi i można opisać je równaniem

$$y = A \sin \omega t \,,$$

gdzie: y - wychylenie z położenia równowagi,
A - amplituda wychylenia,
ω - częstość drgań,
t - czas liczony od momentu wytrącenia cząsteczki z położenia równowagi.

Drgania ośrodka nie zmniejszają się, a są przenoszone wzdłuż tego ośrodka. Zaburzenia w chwili t' późniejszej od $t = 0$ o τ docierają do punktu P. Wychylenie cząstki w punkcie P opisuje równanie:

$$y = A \sin \omega t' = A \sin\left(\omega(t - \tau)\right).$$

Jeżeli ośrodek jest jednorodny to

$$x = v\tau \,,$$

gdzie: x - odległość punktu P od początku układu współrzędnych,
v - prędkość rozchodzenia się zaburzenia,
wówczas

$$y = A \sin\left(\omega\left(t - \frac{x}{v}\right)\right). \qquad /1/$$

Jest to kinetyczne równanie fali płaskiej rozchodzącej się w kierunku osi *x*. Podaje ono zależność od czasu *t* wielkości wychylenia z położenia równowagi punktu odległego od źródła drgań o *x*.

Faza fali określa położenie cząstki drgającej względem punktu równowagi oraz wszystkie parametry jej ruchu. W równaniu /1/ fazą jest argument funkcji sinus.

$$\phi = \omega\left(t - \frac{x}{v}\right). \qquad /2/$$

Czasem faza ma strukturę bardziej złożoną

$$\phi = \omega\left(t - \frac{x}{v}\right) + \phi_0 \quad , \qquad /3/$$

gdzie: ϕ_0 - jest fazą początkową.

Faza początkowa określa położenie cząsteczki drgającej ośrodka względem punktu równowagi, gdy $t = 0$ i $x = 0$.

Zatem różnica faz to

$$\phi - \phi_0 = \omega\left(t - \frac{x}{v}\right),$$

i jeżeli

$$\Delta\phi = \phi - \phi_0 = const,$$

to

$$\omega\left(t - \frac{x}{v}\right) = const\ .$$

Jest to równanie powierzchni falowej.

Prędkość *v* jest prędkością rozprzestrzeniania się powierzchni falowej. Ponieważ powierzchnię falową otrzymujemy jako zbiór punktów o jednakowych fazach, to otrzymana prędkość jest prędkością fazową.

Odległość między kolejnymi punktami w fali będącymi w zgodnych fazach jest długością fali λ, a czas, jaki zaburzenie zużywa na jej pokonanie nazywa się okresem *T*. Zapisujemy to w postaci:

$$v = \frac{\lambda}{T} = \lambda f\ , \qquad /4/$$

gdzie: *f* - jest częstotliwością, bo $\frac{1}{T} = f$.

Częstość kołowa

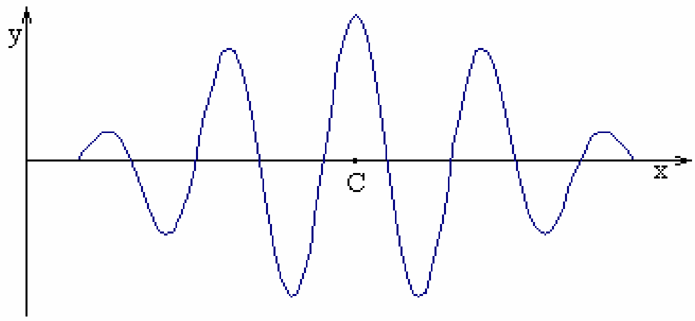
$$\omega = 2\pi f\ . \qquad /5/$$

Wykorzystując związki /4/ i /5/ fazę /3/ możemy zapisać wzorem

$$\phi = 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right) = 2\pi\left(ft - \frac{x}{\lambda}\right).$$

W jednorodnym ośrodku trójwymiarowym źródła punktowe wytwarzają fale kuliste.

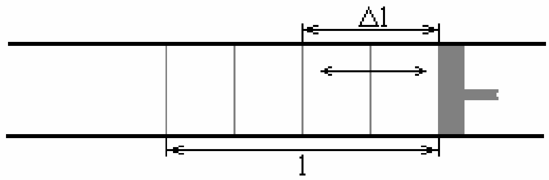
W opisanych przypadkach energia niesiona przez falę rozprzestrzenia się z prędkością fazową. Jeżeli środowisko jest dyspersyjne to prędkość rozprzestrzeniania się zaburzenia zależy od częstotliwości. W przypadku rozprzestrzeniania się w takim ośrodku kilku fal o zbliżonych częstotliwościach (niewiele się różniących) energia rozprzestrzenia się z prędkością inną niż prędkość fazowa. Nałożenie się wielu fal o zmiennych częstotliwościach tworzy paczkę falową.



Rys. 9.2

W każdym momencie czasu maksymalna amplituda rozprzestrzeniającej się w jednym kierunku paczki odpowiada tej części przestrzeni, w której znajduje się maksimum energii fal (centrum paczki C). Centrum przemieszcza się w przestrzeni a z nim energia fali. W centrum paczki fazy fal tworzących paczkę są zgodne i faza w tym obszarze nie zależy od długości fali.

Zbadajmy falę rozchodzącą się w ośrodku doskonale sprężystym. Pod wpływem krótkotrwałego działania siły F cząsteczki ośrodka poruszają się z prędkością



$$u = \Delta l / \Delta t \,,$$

gdzie: Δl - przemieszczenie w kierunku ruchu cząsteczek.

W tym samym czasie Δt zaburzenie w ośrodku przebiega odcinek l z prędkością v

$$l = v\Delta t \,.$$

Z drugiej zasady dynamiki

$$F\,\Delta t = m\,u \,,$$

przy czym

$$m = \rho S l \,,$$

gdzie: ρ - gęstość ośrodka,

S - powierzchnia części zaburzenia.

Zatem

$$F\Delta t = \rho S l \frac{\Delta l}{\Delta t} \,.$$

Z prawa Hooke'a dla odkształceń objętościowych mamy:

$$\frac{F}{S} = K \frac{\Delta V}{V} \,,$$

gdzie: K - jest współczynnikiem ściśliwości.

Z dwóch ostatnich wzorów łatwo zauważyć, że

$$v = \sqrt{\frac{K}{\rho}}\ .$$

Wzór pozwala obliczyć prędkość rozchodzenia się dźwięku w ośrodku sprężystym. Dla gazów wygodniej skorzystać ze wzoru:

$$v = \sqrt{\frac{\chi p}{\rho}}\ ,$$

gdzie: $\chi = c_p / c_V$,

lub

$$v = \sqrt{\frac{\chi R T}{\mu}}\ ,$$

gdzie: p - ciśnienie ,

c_p - ciepło właściwe pod stałym ciśnieniem ,

c_V - ciepło właściwe w stałej objętości ,

R - stała gazowa,

T - temperatura bezwzględna gazu,

μ - masa cząsteczkowa.

Jeżeli weźmiemy pod uwagę powietrze, to

$$\frac{\chi R}{\mu} = k' \cong 0{,}4 \left[\frac{m^2}{s^2 K}\right],$$

wówczas

$$v = \sqrt{k'T} = k\sqrt{T}\ . \qquad /7/$$

W temperaturze T_0 prędkość

$$v_0 = k\sqrt{T_0}\ . \qquad /8/$$

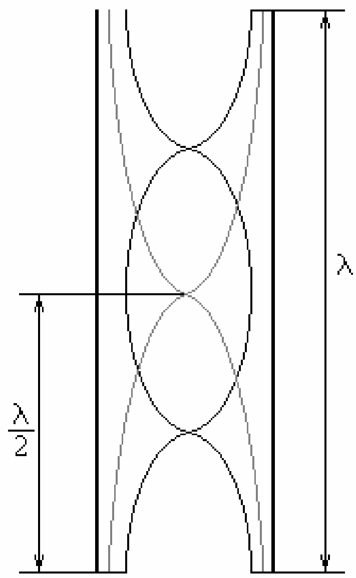
Ze wzorów /7/ i /8/ otrzymujemy

$$v = v_0\sqrt{\frac{T}{T_0}}\ . \qquad /9/$$

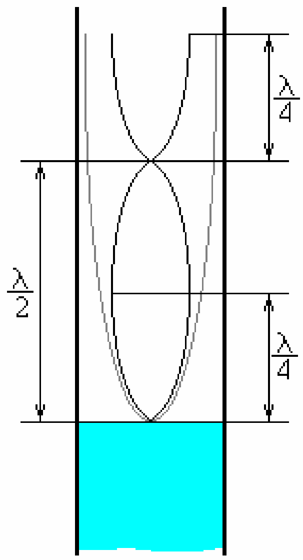
Źródła dźwięku

Źródłami dźwięku są drgające z odpowiednią częstotliwością struny, pręty, płyty, słupy powietrza itp. Drgająca struna, kamerton, często jest źródłem mało słyszalnym. Tłumaczymy to słabym sprzężeniem układu drgającego z otaczającym powietrzem. Aby te sprzężenia wzmocnić umieszcza się źródła dźwięku na różnego rodzaju podłożach rezonansowych. Rezonans akustyczny polega na tym, że drgania źródła wzbudzają drgania tych ciał w otoczeniu źródła, których częstości drgań własnych są równe częstości drgań źródła. Przykładem opisanego zjawiska może być rezonans zachodzący w słupach powietrza pod wpływem drgań widełek kamertonu, membrany głośnika itp.

Jeżeli częstość drgań własnych słupa powietrza zawartego w rurze jednostronnie zamkniętej, jest taka jak źródła zewnętrznego, to słabe zaburzenia wywołane przez źródło pobudzają do drgań słup powietrza. Fala padająca odbija się od ośrodka gęstszego (dna cylindra czy powierzchni wody w cylindrze) i interferuje z falą padającą tworząc falę stojącą, w której strzałka powstaje zawsze przy wylocie cylindra, a węzeł na powierzchni wody (dna) (patrz rysunek 9.2).



Rys. 9.1

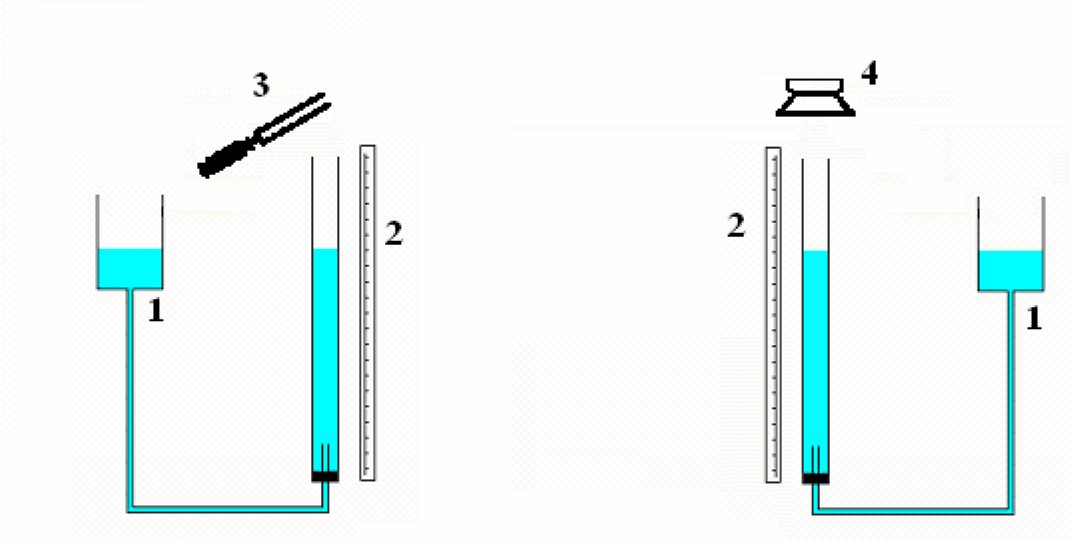


Rys. 9.2

W przypadku rury otwartej na obu jej końcach (patrz rysunek 9.1).powstają strzałki ponieważ fala padająca odbija się od ośrodka nie gęstszego niż powietrze w rurze. Zazwyczaj obok tonu podstawowego odpowiadającego największej długości fali (na rysunkach oznaczonej jasną linią) i najmniejszej częstotliwości w rurze wzbudzają się tzw. tony harmoniczne, których częstotliwość jest całkowitą wielokrotnością częstotliwości tonu podstawowego (na rysunkach oznaczono ton harmoniczny ciemną linią). Ponieważ fala akustyczna jako fala podłużna polega na rozchodzeniu się odkształceń objętości, którym towarzyszą zmiany ciśnienia, strzałka tej fali oznacza miejsce, w którym zmiany amplitudy ciśnienia są największe, a węzeł miejsca, w których ciśnienie nie ulega zmianie. Fala stojąca w słupie powietrza ograniczonym ściankami naczynia (w naszym przypadku rury) jest źródłem bardzo intensywnego dźwięku o częstotliwości źródła zewnętrznego. Jest to efekt rezonansu akustycznego.

3. Opis urządzenia pomiarowego

Urządzenie składa się z dwu naczyń połączonych wężem gumowym umocowanych w statywach częściowo napełnionych wodą (patrz rysunek poniżej).



Rys. 9.7

Przesuwając naczynie (1) z góry do dołu lub odwrotnie zmieniamy położenie poziomu wody w naczyniu pionowym, a tym samym zmieniamy wysokość słupa powietrza zawartego w rurze nad powierzchnią wody. Położenie poziomu wody odczytujemy z milimetrowej podziałki umieszczonej obok. Nad wylotem rury umieszczamy pobudzony kamerton (3) lub głośnik zasilany z generatora drgań akustycznych (4).

4. Opis ćwiczenia

W pierwszej części ćwiczenia pobudzony do drgań kamerton umieszczamy u wylotu rury i tak podwyższamy lub opuszczamy ruchome naczynie, aby poziom wody w nieruchomym naczyniu ustalił wysokość słupa powietrza, w którym następuje rezonans drgań z drganiami kamertonu. Zmieniając odpowiednio poziom wody, znajdujemy drugie położenie, przy którym obserwujemy wzmocnienie dźwięku, a więc rezonans. Odległość między kolejnymi położeniami poziomu wody w nieruchomym naczyniu, kiedy zachodzi rezonans w przybliżeniu odpowiada połowie długości fali:

$$\frac{\lambda}{2} = l_2 - l_1, \qquad /22/$$

gdzie: l_1 - położenie poziomu wody podczas pierwszego wzmocnienia dźwięku,
l_2 - położenie poziomu wody podczas drugiego wzmocnienia.

W drugiej serii pomiarów źródłem dźwięku jest membrana głośnika połączona z generatorem akustycznym.

Korzystając ze wzoru:

$$\nu = \frac{v_0}{2(l_2 - l_1)} \sqrt{\frac{T}{T_0}}. \qquad /23/$$

obliczamy częstość drgań kamertonu i membrany głośnika.

5. Przebieg pomiarów

1. Pobudzamy do drgań widełki kamertonu umieszczając je u wylotu rury rys. 9.7.
2. Wyznaczamy pierwsze położenie (l_1) (najwyższe) poziomu wody, przy którym następuje wzmocnienie dźwięku.
3. Wyznaczamy drugie położenie (l_2) poziomu wody, przy którym obserwujemy ponowne wzmocnienie. Wyniki zapisujemy w tabeli:

Temperatura otoczenia				
Lp	kamerton		generator	
	l_1	l_2	l_1	l_2
1				
2				
3				
średnia				

4. Mierzymy temperaturę powietrza.
5. Obliczamy częstotliwość drgań widełek kamertonu ze wzoru /23/, przyjmując $v_0 = 331$ m/s.
6. Pomiary i obliczenia z punktów 1 - 3 powtarzamy trzykrotnie.
7. Szacujemy szerokość niepewności położenia poziomu (Δl) wody, przy którym słyszymy dźwięk o maksymalnej głośności.
8. Umieszczamy nad wylotem rury głośnik. Dobieramy ton uzyskany z głośnika regulując częstotliwość generatora, aby uzyskać zbliżoną wysokość tonu do tonu uzyskiwanego z pobudzonego kamertonu.
9. Pomiary z pkt. 1 - 3 powtarzamy 3 - krotnie.
10. Pomiary z pkt. 1 - 3 powtarzamy 3 - krotnie dla innej częstotliwości, znajdujemy możliwie największą ilość położeń, przy których następuje wzmocnienie dźwięku.

Temperatura otoczenia					
Lp	generator				
	l_1	l_2	l_3		l_n
1					
2					
3					
średnia					

11. Obliczamy częstotliwość średnią dla każdej serii pomiarów.
12. Przeprowadzamy rachunek błędów dla każdej serii pomiarów.
13. Porównujemy wyniki uzyskane w punkcie 8 i 14 i wyciągamy wnioski.

6. Literatura

1. A. Daniluk - Instrukcje ćwiczeń laboratoryjnych z fizyki UPH Siedlce 1999
2. Halliday D., Resnick R., Walker J., *Podstawy fizyki,* PWN, Warszawa 2003, tom 2.
3. Szydłowski H., *Pracownia fizyczna*. PWN, Warszawa, 1994.