

VII. AKUSTYKA BUDOWLI

36 Wprowadzenie

Akustyka jest nauką o dźwięku, mechanizmach jego powstawania i propagacji w ośrodku stałym, ciekłym i gazowym. Opisuje więc periodyczne zaburzenia natury mechanicznej w ośrodku i ich propagację.

W zależności od częstotliwości dźwięki można podzielić na:

- *infradźwięki o zakresie częstotliwości* $0 - 20 \text{ Hz}$,
- *dźwięki słyszalne* $20\text{Hz} - 20\text{kHz}$,
- *ultradźwięki* $> 20\text{kHz}$,
- *hiperdźwięki* $> 100 \text{ MHz}$.

Te periodyczne zaburzenia rozchodzące się w ośrodku sprężystym nazywamy falami akustycznymi, złożonymi z kombinacji *dźwięków prostych* czyli *tonów charakteryzujących się jedną częstotliwością i amplitudą*. Fala ta jako funkcja czasu i przestrzeni jest przedstawiana w postaci sinusoidy o określonym okresie i długości fali. Istotnie, dźwięki i drgania w analizie harmonicznnej można przedstawić w formie szeregu prostych fal sinusoidalnych postaci

$$u(x_i, t) = u_0 \sin\left(\frac{2\pi t}{T} - k_i x_i\right), \quad (36.1)$$

gdzie u_0 jest amplitudą przemieszczenia u , T – okresem, a k_i – wektorem falowym.

Prędkość rozchodzenia się fal określa wzór:

$$v = \dot{u} = u_0 \frac{2\pi}{T} \cos\left(\frac{2\pi t}{T} - k_i x_i\right). \quad (36.2)$$

Ogólnie

$$u_i = u_{i0} e^{-i(\omega t \pm k_i x_i)}, \quad (36.3)$$

gdzie u_i i u_{i0} określa przemieszczenie cząstki x , amplitudę przemieszczeń, k_i - wektor falowy, x_i, t – położenie cząstki x i czas.

37 Równanie falowe

Zakładamy doskonałą sprężystość, ciągłość i jednorodność ośrodka ciekłego lub gazowego, w którym będzie się rozchodziła fala. Sama fala będzie miała małą amplitudę i nie wprowadzi nieliniowości do rozważań. Ośrodek

na początku procesu będzie opisany ciśnieniem P_0 , objętością V_0 i temperaturą T_0 przed przejściem fali oraz ciśnieniem P , objętością V i temperaturą T w trakcie zaburzenia. Wówczas ciśnienie akustyczne $p = P - P_0$ [Pa] oraz przesunięcie cząstki \mathbf{u} i jej prędkość $\mathbf{v} = \dot{\mathbf{u}}$ są podstawowymi parametrami procesu akustycznego.

Proces ten opisuje fala akustyczna spełniająca równania:

$$\text{- ciągłości} \quad \operatorname{div} \mathbf{u} = \frac{dV}{V} \quad \text{lub} \quad u_{i,i} = \varepsilon_{ii} = \frac{\Delta V}{V}, \quad (37.1)$$

$$\text{- ruchu} \quad \frac{\partial p}{\partial x_i} = -\rho_0 \frac{\partial v_i}{\partial t}, \quad (37.2)$$

$$\text{- równanie stanu łączące ciśnienie } p \text{ z dylatacją } \varepsilon_{ii} = \frac{dV}{V}$$

$$p = K \frac{dV}{V}. \quad (37.3)$$

W wyniku przekształceń z zależności tych otrzymamy równanie falowe

$$K \frac{\partial^2 p}{\partial x_i \partial x_i} = \rho_0 \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}. \quad (37.4)$$

W równaniu tym stosunek K / ρ_0 określa prędkość propagacji fali c zgodnie z wzorem

$$c^2 = \frac{K}{\rho_0}. \quad (37.5)$$

Ogólna postać równania falowego

$$K \frac{\partial^2 A}{\partial x_i \partial x_i} = \rho \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} \quad \text{lub} \quad \frac{\partial^2 \phi}{\partial x_i \partial x_i} + k^2 \phi = 0, \quad (37.6)$$

$$v_i = -\dot{\phi}_{,i}, \quad k = \frac{\omega}{c}, \quad \omega = \frac{2\pi}{T};$$

W równaniu tym ϕ jest *potencjałem akustycznym*.

W zastosowaniach akustyki interesuje nas głównie **natężenie dźwięku**, które jest wielkością wektorową zdefiniowaną jako średnia za okres T

$$I_i = \frac{1}{T} \int_0^T p v_i dt \quad (37.7)$$

z iloczynu ciśnienia akustycznego i prędkości cząstki v_i (prędkości akustycznej).

Gęstość strumienia energii $E_i = p v_i$ opisuje wartość i kierunek przepływu fali. Dla fali sinusoidalnej o okresie T przy przebiegu ciśnienia p i prędkości v

$$p = |p| \cos(\omega t - kx), \quad v = |v| \cos(\omega t - kx) \quad (37.8)$$

będzie

$$I = \frac{1}{2} |p| |v| \cos(kx). \quad (38.9)$$

We wzorach tych symbolami p , v , I oznaczono kolejno ciśnienie [P_a], prędkość akustyczną [m/s] i natężenie dźwięku [W/m^2].

W praktyce korzysta się też z *poziomu ciśnienia* (SPL)

$$L_p = 20 \log P / p_1 \quad [dB] \quad (37.10)$$

i *poziomu natężenia dźwięku*

$$L_L = 10 \log I / I_0 \quad [dB]. \quad (37.11)$$

W warunkach idealnych, bez strat energii akustycznej obserwujemy zmniejszanie się z odległością poziomu natężenia dźwięku L_L , zgodnie z zależnością:

$$L_1 - L_2 = 20 \log \frac{r_2}{r_1} \quad (37.12)$$

gdzie L_1 i L_2 są poziomami natężenia dźwięku (dB) w odległości r_1 i r_2 od źródła dźwięku.

38 Rodzaje fal

W akustyce budowlanej występują skomplikowane kombinacje przepływów falowych o złożonej strukturze. Jednak w rozważaniach teoretycznych i zastosowaniach najczęściej spotykamy się z falą płaską oraz kulistą. Opisują je najprostsze postaci równań falowych, które posiadają rozwiązania zamknięte.

Cechy fali płaskiej:

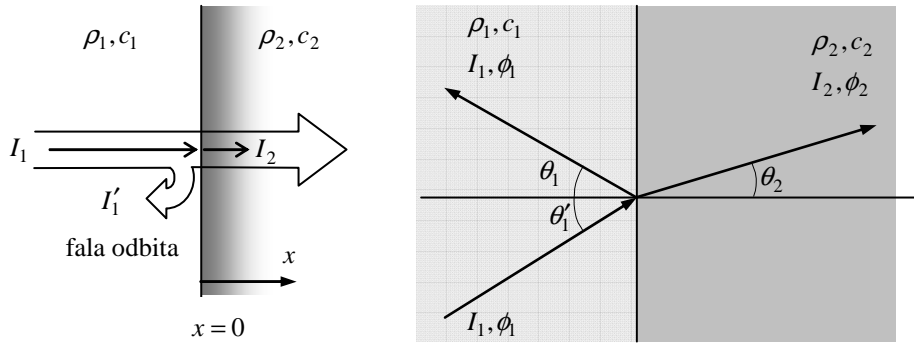
- jeden kierunek propagacji ($u_1 \neq 0, \quad u_2 = 0, \quad u_3 = 0$),
- stała amplituda.

Cechy fali kulistej:

- rozchodzi się jednakowo we wszystkich kierunkach,
- amplituda potencjału jest odwrotnie proporcjonalna do odległości,
- cząstki na sferach, tym samym promieniu przemieszczają się tak samo wzdłuż promienia sfery.

39 Odbicie i załamanie fal akustycznych

Dotychczasowe rozważania dotyczyły rozchodzenia się fal w nieograniczonym ośrodku ρ_1, c_1 . Natomiast przy przejściu fali z ośrodka (1) o gęstości ρ_1 i prędkości propagacji c_1 do ośrodka (2) o odmiennych wartościach ρ_2 i c_2 dochodzi do adsorpcji i odbicia fali oraz propagacji fali w ośrodku (2) o odmiennych własnościach.



Rys. 39.1. Fala na styku dwóch ośrodków

W zetknięciu się dwóch ośrodków ($x = 0$) ciśnienia i prędkości są sobie równe, czyli

$$v_x^{(1)} = v_x^{(2)}, \quad p^{(1)} = p^{(2)}. \quad (39.1)$$

Z równości tych po uwzględnieniu równania na potencjały falowe ϕ_1 i ϕ_2 otrzymamy

$$\frac{\phi_1}{\phi_1} = \frac{Z_2 \cos \phi_1 - Z_1 \cos \phi_2}{Z_2 \cos \phi_1 + Z_1 \cos \phi_2} = \frac{Z_{2n} - Z_{1n}}{Z_{2n} + Z_{1n}}, \quad (39.2)$$

$$\frac{\phi_2}{\phi_1} = \frac{2\rho_1 c_2}{Z_{2n} + Z_{1n}}, \quad (39.3)$$

gdzie $Z_{1n} = \frac{p_1}{v_{1x}}$, $Z_{2n} = \frac{p_2}{v_{2x}}$.

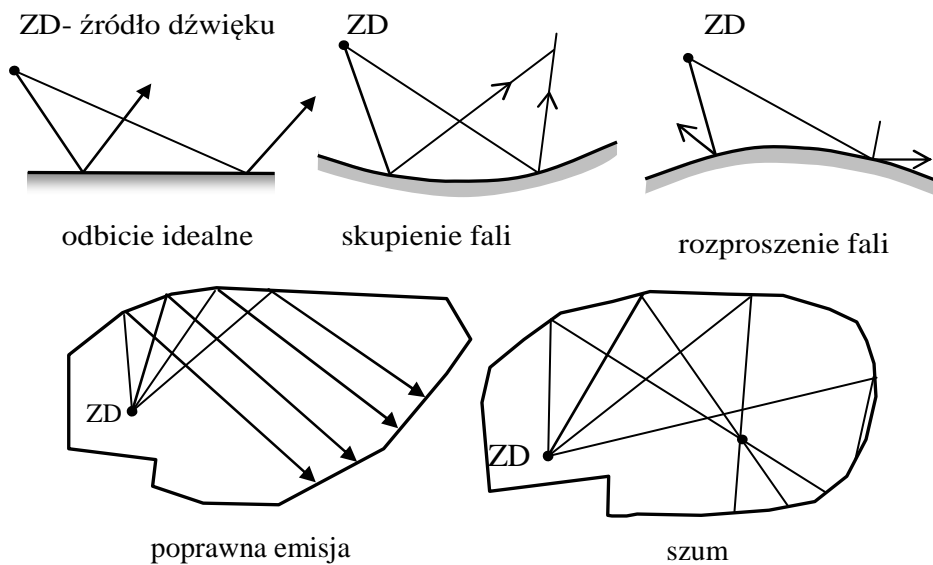
Na podstawie tych wielkości możemy zdefiniować wskaźniki i współczynniki odbicia i przenikania:

- wskaźnik przenikania fali $\frac{v_1}{v_2} = \frac{c_1 \phi_2}{c_2 \phi_1} = \frac{c_1 \rho_1 p_2}{c_2 \rho_2 p_1}$,

- wskaźnik odbicia fali $\frac{p_1'}{p_1} = \frac{\phi_1'}{\phi_1}$,
- współczynnik przenikania $\frac{Z_{2n} \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^2}{Z_{1n}}$,
- współczynnik odbicia $\left(\frac{p_1'}{p}\right)^2$.

Wyszczególnione wielkości pozwalają ocenić zmiany parametrów fali akustycznej przy zetknięciu się z przegrodą.

Przedstawimy obecnie kilka typowych sytuacji odbić i absorpcji fal związanych z akustyką budowlaną.



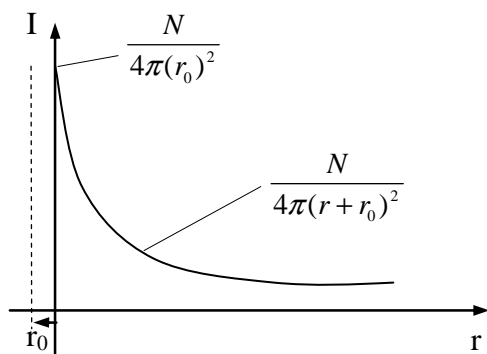
Rys. 39.2. Elementarne przypadki odbić fal od powierzchni ścian

40 Pole akustyczne w otoczeniu źródła dźwięku

Wypromieniowanie przez źródło dźwięku pewnej ilości energii N prowadzi do propagacji fali kulistej o środku w źródle dźwięku. W przypadku pominięcia mechanizmów dyssypacji, kiedy propaguje się fala kulista w ośrodku sprężystym natężenie dźwięku I w odległości r od źródła wynosi

$$I = \frac{N}{4\pi r^2} \left[W / m^2 \right]. \quad (40.1)$$

Zasadniczy wpływ na propagację energii akustycznej ma *oporność ośrodka*, w którym rozprzestrzenia się fala. Z tej przyczyny szybko rozprzestrzenia się w betonie, a znacznie wolniej w materiałach porowatych czy też gruncie.



Rys. 40.1. Natężenie dźwięku I w zależności od odległości r

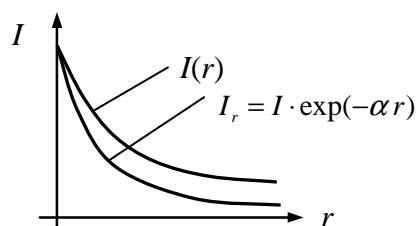
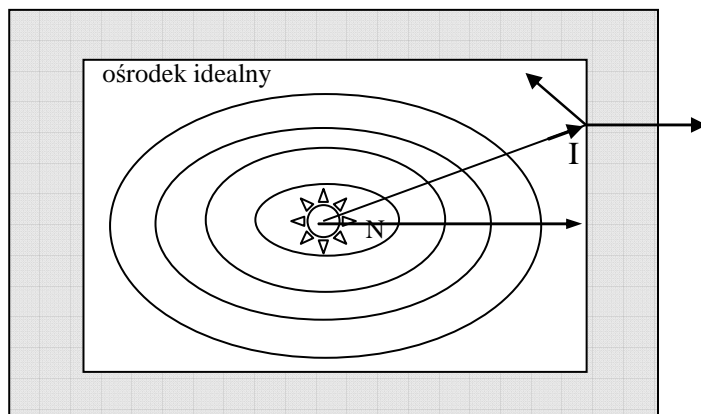
Proces ten opisuje współczynnik tłumienia przez ośrodek $\alpha [m^{-1}]$. W ten sposób wyjściowy wzór zostaje zmodyfikowany

$$I_r = \frac{N}{4\pi r^2} e^{-\alpha r} \left[W / m^2 \right]. \quad (40.2)$$

Znajomość natężenia dźwięku pozwala wyznaczyć poziom natężenia dźwięku jako wielkość określającą warunki akustyczne pomieszczeń

$$L_1 = 10 \log \frac{I}{I_0} = 10 \left(\log \frac{N}{4\pi r^2} - \log I_0 \right) [dB]. \quad (40.3)$$

W równaniu tym $I_0 = 10^{-12} N / m^2$ jest natężeniem dźwięku odniesienia. Na poziom natężenia dźwięku nakładane są ograniczenia wynikające z warunków życia i pracy w pomieszczeniach bytowych. Podobna sytuacja dotyczy emisji dźwięku przez pojazdy na ulicy, które stają się źródłem dźwięku oraz przechodniami - odbiorcami dźwięku.



Rys.40.2. Propagacja fali akustycznej oraz zanik intensywności ciśnienia akustycznego od odległości

41. Aktywne tłumienie dźwięków

Ważnym współcześnie problemem jest ochrona człowieka przed nadmiarem hałasu. Istnieje wręcz potrzeba pełnego wytłumienia pomieszczeń sal wykładowych, konferencyjnych, nie mówiąc o salach teatralnych czy koncertowych. Stawiając problem izolacji akustycznej w stosunku do źródeł dźwięków pochodzących z ruchu samochodów, trzeba znać zarówno parametry hałasu, ich odległość od budynków, jak i własności tłumiące przegród budowlanych. Okazuje się przy tym, że przekaz hałasu najczęściej odbywa się w zasadniczym stopniu przez otwory okienne. Powstała wówczas idea aktywnego tłumienia dźwięków poprzez szyby okienne. Wprowadza się wówczas w miejscach wprowadzenia szyby w okiennicy dodatkowe tłumiki piezoelektryczne połączone z układem oceniającym natężenie dźwięku zewnętrznego. Miernik tego dźwięku steruje przepływami elektryczności w piezoelektrycznych elementach tłumiących w taki sposób, aby wygenerowane fale miały prawie identyczne częstotliwości jak dźwięk zewnętrzny i taką samą, ale przeciwnie zorientowaną amplitudę.

Nakładanie się fali akustycznej z zewnątrz oraz wytworzonej przez elementy piezoelektryczne prowadzi do zanikania wypadkowej fali w pomieszczeniu izolowanym akustycznie.

Przykład VII.1

Należy określić w terenie otwartym minimalną odległość r_2 od drogi, miejsca, w którym poziom natężenia dźwięku L_2 (dB) będzie mniejszy od wartości dopuszczalnej L_2^0 , jeżeli na poboczu drogi o szerokości l stwierdzono poziom dźwięku L_1 (dB).

Odpowiedź:

Korzystamy ze wzoru na spadek natężenia dźwięku w warunkach idealnych, czyli:

$$L_1 - L_2 = 20 \log\left(\frac{4r_2 + l}{4}\right), \quad r = \frac{l}{4}, \quad L_2 \leq L^0$$

Znając L_1 , L^0 oraz l , wyznaczmy r_2 :

$$\log\left(\frac{4r_2 + l}{4}\right) = \frac{L_1 - L_0}{20},$$

$$r_2 \geq \frac{4}{l} \cdot 10 \exp\left(\frac{L_1 - L_0}{20}\right) - \frac{l}{4}.$$