

Jacek Nurzyński*

WSPÓŁCZYNNIK PROMIENIOWANIA DŹWIĘKU ŚCIAN SZKIELETOWYCH Z PŁYT GIPSOWO-KARTONOWYCH

Współczynnik promieniowania odgrywa kluczową rolę przy określaniu izolacyjności akustycznej konkretnej przegrody w budynku na podstawie pomiaru prędkości drgań powierzchniowych. W przypadku masywnych ścian i stropów, powyżej częstotliwości koincydencji, współczynnik przyjmuje wartość zbliżoną do jedności, natomiast w przypadku lekkich ścian z płyt gipsowo-kartonowych wartość współczynnika nie jest dokładnie znana. Zależności teoretyczne dają rezultaty, które nie są wystarczająco dokładne do praktycznego zastosowania. Artykuł prezentuje wyniki badań przeprowadzonych nad współczynnikiem promieniowania ścian szkieletowych z płyt gipsowo-kartonowych oparte na standardowych badaniach laboratoryjnych izolacyjności akustycznej właściwej oraz na prowadzonych równoległe pomiarach drgań powierzchniowych. Badania wykonano na 18 różnych lekkich ścianach szkieletowych i na 3 ścianach masywnych z okładzinami wykonanymi z płyt gipsowo-kartonowych opartych na odrębnym szkielecie. W rezultacie badań zostały określone wartości współczynnika promieniowania dla ścian o różnej konstrukcji. Wartości te mogą być przydatne przy analizie dróg transmisji dźwięku w budynku.

1. Wstęp

Wartość współczynnika promieniowania energii akustycznej charakterystyczna dla danej przegrody budowlanej ma zasadnicze znaczenie przy ocenie izolacyjności akustycznej tej przegrody wykonywanej metodą opartą na pomiarze prędkości drgań powierzchniowych. Taka metoda może być wykorzystywana do identyfikacji dróg transmisji dźwięku występujących w warunkach rzeczywistych w konkretnym budynku. W praktyce jest stosowana jedynie w budynkach masywnych przy analizie przenoszenia bocznego. W przypadku tradycyjnych masywnych ścian i stropów częstotliwość koincydencji jest położona w pasmach niskich i niemal cała krzywa izolacyjności akustycznej, która jest brana pod uwagę w akustyce budowlanej, znajduje się powyżej tej częstotliwości. W takiej sytuacji zadowalającą dokładność wyników opartych na pomiarze drgań można uzyskać, stosując wartość współczynnika promieniowania $\sigma = 1$. W przypadku lekkich przegród szkieletowych z płyt gipsowo-kartonowych częstotliwość koincydencji

* dr inż. – adiunkt w Zakładzie Akustyki ITB

występuje w pasmach wysokich, zwykle w rejonie 3150 Hz. Niemal cały rozpatrywany fragment krzywej izolacyjności akustycznej znajduje się więc poniżej tej częstotliwości. Ustalenie praktycznej wartości współczynnika promieniowania w tym zakresie jest trudne. Istniejące ogólne zależności teoretyczne zastosowane do lekkich ścian z płyt gipsowo-kartonowych nie zapewniają zadowalającej zgodności z rzeczywistą izolacyjnością akustyczną uzyskiwaną metodą standardową.

W artykule przedstawiono wyniki empirycznych badań laboratoryjnych przeprowadzonych w latach 2005–2006 nad współczynnikiem promieniowania ścian szkieletowych z płyt gipsowo-kartonowych. Na podstawie uzyskanych wyników ustalono praktyczne wartości współczynnika promieniowania dla podstawowych typów ścian szkieletowych. Wartości te różnią się w znaczący sposób od obliczonych na podstawie znanych zależności teoretycznych, głównie ze względu na występujące tłumienie wewnętrzne, które poniżej częstotliwości krytycznej odgrywa szczególnie istotną rolę. Ustalone doświadczalnie wartości współczynnika promieniowania mogą być wykorzystywane w dalszych badaniach nad transmisją dźwięku w budynku o lekkiej konstrukcji oraz w pracach diagnostycznych wykonywanych w konkretnych obiektach.

2. Promieniowanie energii akustycznej przez przegrodę budowlaną

Rozpatrując drogi transmisji dźwięku przenoszonego do pomieszczenia znajdującego się w określonym układzie konstrukcyjnym budynku, każdą przegrodę ograniczającą to pomieszczenie można traktować jako odrębne źródło emitujące energię akustyczną do jego wnętrza. Moc akustyczną, jaka jest promieniowana przez pobudzoną do drgań przegrodę, można przedstawić jako funkcję prędkości drgań powierzchniowych zgodnie z równaniem

$$W = \rho_0 c_0 S v^2 \sigma \quad (1)$$

gdzie: ρ_0 – gęstość powietrza, w temperaturze 20°C $\rho_0 = 1,2 \text{ kg/m}^3$,
 c_0 – prędkość rozchodzenia się fal podłużnych w powietrzu,
 S – pole powierzchni przegrody promieniującej energię akustyczną, m^2 ,
 v – prędkość drgań powierzchniowych, m/s ,
 σ – współczynnik promieniowania.

Z ogólnej zależności występującej pomiędzy mocą akustyczną źródła dźwięku działającego w pomieszczeniu zamkniętym a natężeniem dźwięku, oraz uwzględniając równanie (1), można określić poziom ciśnienia akustycznego w tym pomieszczeniu w zależności od prędkości drgań powierzchniowych przegrody stanowiącej źródło dźwięku:

$$L_2 = 10 \log \frac{4 \rho_0 c_0 S v^2 \sigma}{A I_0} \quad (2)$$

gdzie: L_2 – poziom ciśnienia akustycznego w pomieszczeniu odbiorczym, dB,

A – równoważne pole powierzchni dźwiękochłonnej pomieszczenia odbiorczego, m^2 ,

I_0 – natężenie dźwięku odniesienia, $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$.

Zależność (2) została wykorzystana w części badawczej pracy do ustalenia empirycznej wartości współczynnika promieniowania przegród szkieletowych wykonanych z płyt gipsowo-kartonowych. Wartość współczynnika określono na podstawie badań laboratoryjnych, których wyniki przedstawiono w dalszej części artykułu.

Równanie (2) można przedstawić w innej, wygodniejszej postaci, wprowadzając poziom prędkości drgań powierzchniowych jako parametr możliwy do ustalenia metodą pomiarową:

$$L_2 = 10 \log \frac{\rho_0 c_0 v_0^2}{I_0} + 10 \log \frac{4S}{A} + L_v + 10 \log \sigma \quad (3)$$

$$L_2 = L_v + 10 \log \sigma + 10 \log \frac{4S}{A} - 34 \text{ dB} \quad (4)$$

gdzie: L_v – poziom prędkości drgań powierzchniowych, $L_v = 20 \log (v/v_0)$,
 v_0 – prędkość odniesienia, $v_0 = 10^{-9} \text{ m/s}$.

Równanie (4), po przekształceniu, umożliwia również obliczenie izolacyjności akustycznej uzyskiwanej przez przegrodę w warunkach laboratoryjnych, tj. na stanowisku z wyeliminowanym przenoszeniem bocznym, w zależności od poziomu prędkości drgań powierzchniowych:

$$R = L_1 - L_v - 10 \log \sigma + 28 \text{ dB} \quad (5)$$

Zależność (5) wykorzystano w celach weryfikacyjnych. Określona na podstawie przeprowadzonych prac badawczych wartość współczynnika promieniowania zastosowana w równaniu (5) została skonfrontowana z wynikami standardowych pomiarów izolacyjności akustycznej właściwej. W niektórych publikacjach jest stosowane pojęcie izolacyjności promieniowania, która jest określona wzorem

$$R_\sigma = 10 \log \frac{1}{\sigma} \quad (6)$$

Przy takim oznaczeniu wzór (5) przybiera postać

$$R = L_1 - L_v + R_\sigma + 28 \text{ dB} \quad (7)$$

* W praktyce jest stosowana również inna wartość prędkości odniesienia $v_0 = 5 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$, w związku z czym należy zawsze podawać wartość prędkości odniesienia stosowaną w konkretnym przypadku w obliczeniach lub przy prowadzeniu pomiarów akustycznych. Przyjmując prędkość odniesienia $v_0 = 5 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$

pierwszy człon równania (3) $10 \log \frac{\rho_0 c_0 v_0^2}{I_0}$ jest równy 0 dB. Relacja występująca pomiędzy obydwiema

stosowanymi wartościami odniesienia wynosi $10 \log \frac{5 \cdot 10^{-8}}{10^{-9}} = 34 \text{ dB}$.

3. Współczynnik promieniowania, zależności teoretyczne

Współczynnik promieniowania energii akustycznej jest wyrażony w postaci charakterystyki częstotliwościowej przedstawiającej jego wartość w poszczególnych pasmach tercjowych. Istotne znaczenie dla przebiegu tej charakterystyki ma położenie częstotliwości koincydencji. W pasmach znajdujących się powyżej częstotliwości koincydencji wartość współczynnika promieniowania jest określona wzorem

$$\sigma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{f_c}{f}}} \quad (8)$$

gdzie: f_c – częstotliwość koincydencji danej przegrody, Hz.

W tym zakresie wartość współczynnika promieniowania nie jest zależna od parametrów geometrycznych przegrody ani od współczynnika tłumienia wewnętrznego, istotne jest jedynie położenie częstotliwości krytycznej. Częstotliwość koincydencji można obliczyć korzystając z zależności (9)

$$f_c = \frac{c_0^2}{1,8 c_L t} \quad (9)$$

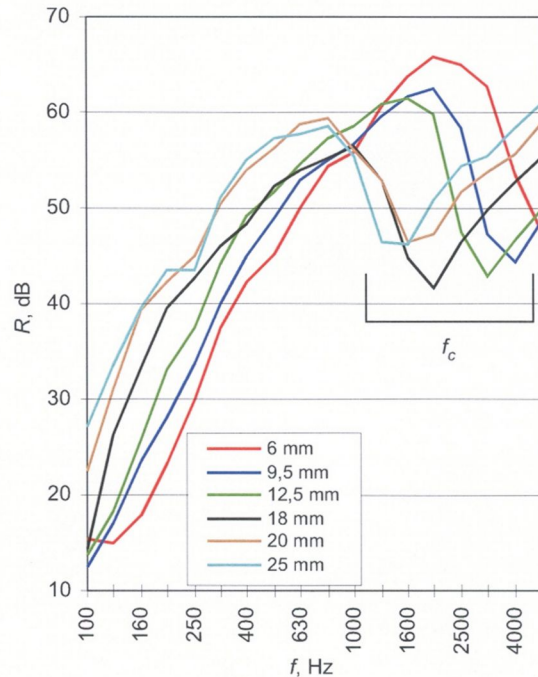
gdzie: c_L – prędkość fal podłużnych w materiale (przegrodzie), m/s,
 t – grubość przegrody, m.

W przypadku tradycyjnych masywnych przegród budowlanych częstotliwość koincydencji jest położona w pasmach niskich, najczęściej w zakresie 100–200 Hz. Niemal cała krzywa izolacyjności akustycznej właściwej znajduje się powyżej tego zakresu. Wartość współczynnika promieniowania jest wówczas określona wzorem (8). W praktyce stosowanie w tym zakresie wartości $\sigma = 1$ daje dobrą zgodność z wynikami standardowego pomiaru izolacyjności akustycznej właściwej [1–5].

W przypadku lekkich przegród budowlanych wykonanych z płyt o niewielkiej grubości, częstotliwość koincydencji jest położona w pasmach wysokich. Dla ścian szkieletowych z płyt gipsowo-kartonowych wynosi ona $f_c = 1250$ – 5000 Hz, zależnie od grubości płyty i materiału, z jakiego została wykonana. W przypadku najczęściej stosowanych płyt o grubości 12,5 mm częstotliwość koincydencji leży w paśmie $f_c = 2500$ – 3150 Hz. Położenie częstotliwości koincydencji w przypadku płyt gipsowo-kartonowych jest bardzo wyraźnie widoczne na wykresach prezentujących wyniki badań. Rysunek 1 przedstawia wyniki pomiarów laboratoryjnych izolacyjności akustycznej właściwej ścian szkieletowych, w których zastosowano płyty gipsowo-kartonowe o różnej grubości w zakresie $t = (6$ – $25)$ mm. Można zaobserwować zmianę położenia częstotliwości koincydencji w zależności od grubości opłytywania.

Na rysunku 1 jest również widoczne, że w przypadku płyt gipsowo-kartonowych większa część krzywej izolacyjności akustycznej właściwej jest położona poniżej częstotliwości koincydencji. Ustalenie wartości współczynnika promieniowania w tym zakre-

się na podstawie zależności teoretycznych jest trudne, ponieważ promieniowanie fal giętych zależy od kształtu, wymiarów liniowych, sposobu zamocowania przegrody, a także współczynnika strat wewnętrznych [6]. Powyżej częstotliwości koincydencji współczynnik promieniowania jest niezależny od wartości współczynnika strat wewnętrznych η , natomiast poniżej trudno jest dokładnie ustalić, jaki wpływ ma tłumienie wewnętrzne na współczynnik promieniowania – wypromieniowana moc zmniejsza się w stosunku $1/\eta$ [6].



Rys. 1. Wpływ grubości płyty gipsowo-kartonowej (6–25 mm) na położenie częstotliwości koincydencji f_c ; wyniki badań laboratoryjnych
 Fig. 1. The relationship between gypsum plasterboard panel thickness (6–25 mm) and the location of critical frequency f_c ; the results of laboratory tests

Ogólne zależności teoretyczne pozwalające na określenie wartości współczynnika promieniowania w zakresie znajdującym się poniżej częstotliwości koincydencji są podawane przez różnych autorów. W większości przypadków punktem wyjścia jest praca Maidanika [7].

Fasold [1] podaje wzory określające wartości izolacyjności promieniowania zdefiniowanej równaniem (6). Zależnie od rozpatrywanego zakresu częstotliwości wzory te przyjmują postać

$$R_G = 10 \log \frac{S}{U} + 15 \log f_c - 5 \log f - 15 \text{ dB} \quad f \ll f_c \quad (10)$$

$$R_G = 16 - 5 \log U - 5 \log f_c \quad f = f_c \quad (11)$$

gdzie: S – pole powierzchni przegrody, m^2 ,
 U – obwód przegrody, m.

Engel [4] przytacza wzory określające bezpośrednio wartość współczynnika promieniowania zamieszczone w pracy [3]. Wartość współczynnika, podobnie jak w poprzednim przypadku, jest zależna głównie od obwodu i powierzchni płyty promieniującej energią akustyczną:

$$\sigma = \frac{1}{\pi^2} \frac{U}{S} \lambda_c \sqrt{\frac{f}{f_c}} \quad f \ll f_c \quad (12)$$

$$\sigma = 0,45 \sqrt{\frac{U}{\lambda_c}} \quad f = f_c \quad (13)$$

Bardziej szczegółowe zależności [6] wyprowadzone na podstawie prac Maidanika [7] zawierają dodatkowe uściślenia związane z geometrią płyty oraz położeniem częstotliwości koincydencji:

$$\sigma_1 = \frac{\lambda_c^2}{S} \left(2g_1 + \frac{U}{\lambda_c} g_2 \right) \quad f < f_c \quad (14)$$

$$\sigma_2 = \sqrt{\frac{l_1}{\lambda_c}} + \sqrt{\frac{l_2}{\lambda_c}} \quad \lambda_c = \frac{c_0}{f_c} \quad f = f_c \quad (15)$$

gdzie: l_1, l_2 – długość i szerokość płyty (przegrody), m, $l_1 > l_2$,
 S – pole powierzchni przegrody, m², $S = l_1 l_2$,
 U – obwód przegrody, m, $U = 2(l_1 + l_2)$.

$$g_1 = \frac{4}{\pi^4} (1 - 2\alpha^2) \frac{1}{\alpha \sqrt{1 - \alpha^2}} \quad f < 0,5 f_c \quad (16)$$

$$g_1 = 0 \quad 0,5 f_c < f < f_c \quad (17)$$

$$g_2 = \frac{1}{4\pi^4} \frac{(1 - \alpha^2) \ln \frac{1 + \alpha}{1 - \alpha} + 2\alpha}{(1 - \alpha^2)^{3/2}} \quad \alpha = \sqrt{\frac{f}{f_c}} \quad (18)$$

Zależności pozwalające na obliczenie współczynnika promieniowania są również przedstawione w normie [5]. Zostały opracowane na podstawie wcześniejszych prac [7–9]. Stanowią pewną modyfikacją wzorów (14–18). W ogólnym przypadku sposób obliczania współczynnika promieniowania jest tu zależny od położenia częstotliwości koincydencji oraz częstotliwości f_{11} określonej wzorem

$$f_{11} = \frac{c_0^2}{4f_c} \left(\frac{1}{l_1^2} + \frac{1}{l_2^2} \right) \quad (19)$$

W przypadku ścian szkieletowych wykonanych z płyt gipsowo-kartonowych częstotliwość f_{11} w praktyce nie przekracza 70 Hz. Spełniony jest warunek $f_{11} \leq \frac{f_c}{2}$, a więc współczynnik promieniowania dla zakresu $f < f_c$ należy obliczać ze wzoru

$$\sigma = \frac{2(l_1 + l_2)}{l_1 l_2} \frac{c_0}{f_c} \delta_1 + \delta_2 \quad (20)$$

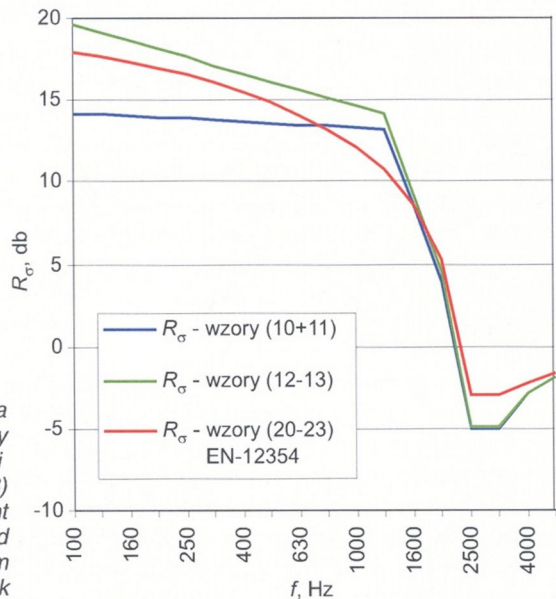
gdzie:

$$\delta_1 = \frac{(1 - \lambda^2) \ln \frac{1 + \lambda}{1 - \lambda} + 2\lambda}{4\pi^2 (1 - \lambda^2)^{1,5}} \quad f > \frac{f_c}{2} \quad (21)$$

$$\delta_2 = 0 \quad f \leq \frac{f_c}{2} \quad (22)$$

$$\delta_2 = \frac{8c^2(1 - 2\lambda^2)}{f_c^2 \pi^4 l_1 l_2 \lambda \sqrt{1 - \lambda^2}} \quad \lambda = \sqrt{\frac{f}{f_c}} \quad (23)$$

Równania (20–23) są słuszne dla płyty otoczonej nieskończoną płaszczyzną, co zwykle odpowiada sytuacji występującej w warunkach laboratoryjnych. W budynkach element konstrukcyjny jest często otoczony elementami prostopadłymi, które powodują zwiększenie sprawności promieniowania poniżej częstotliwości krytycznej [5].



Rys. 2. Izolacyjność promieniowania $R_\sigma = 10 \log (1/\sigma)$ obliczona dla płyty gipsowo-kartonowej o grubości 12,5 mm według wzorów (10–23)
 Fig. 2. Radiation coefficient $R_\sigma = 10 \log (1/\sigma)$ calculated based on formulas (10–23) for gypsum plasterboard panel 12,5 mm thick

Na rysunku 2 pokazano charakterystyki izolacyjności akustycznej promieniowania obliczone dla płyty gipsowo-kartonowej o grubości 12,5 mm na podstawie zależności teoretycznych. W dalszej części artykułu wartości te zostaną skonfrontowane z wynikami badań empirycznych.

4. Badania laboratoryjne

4.1. Próbkki badawcze

Wcześniejsze badania laboratoryjne współczynnika promieniowania płyty gipsowo-kartonowej [6] były wykonywane na małych próbkach przy mechanicznym punktowym pobudzeniu płyty. Badano pojedynczą płytę o grubości 13 mm, która tylko w pewnym stopniu jest reprezentatywna dla ściany szkieletowej stanowiącej złożony układ podwójny wypełniony materiałem dźwiękochłonnym. Ponadto występują różnice pomiędzy wartościami współczynnika promieniowania przy pobudzeniu mechanicznym i powietrznym [10]. W zakresie leżącym poniżej częstotliwości krytycznej wartość współczynnika promieniowania zależy od pola powierzchni i wymiarów rozpatrywanej przegrody. Istotne jest zatem, aby parametry geometryczne badanych próbek były reprezentatywne dla przegród stosowanych w praktyce.

W laboratorium ITB badania współczynnika promieniowania wykonano na próbkach o powierzchni 10 m² i wymiarach zbliżonych do występujących w warunkach rzeczywistych. Również wszystkie szczegóły konstrukcyjne i sposób mocowania płyt był taki sam, jak stosowany w praktyce budowlanej. Badaniom poddano 18 lekkich ścian szkieletowych o różnej konstrukcji oraz 3 ściany masywne z dodatkowymi okładzinami z płyt gipsowo-kartonowych wykonanymi na odrębnym szkielecie. Okładziny są stosowane jako dodatkowy ustrój zwiększający izolacyjność akustyczną ściany.

Badane próbki należały do trzech różnych systemów. Do konstrukcji ścian zastosowano różny rodzaj szkieletu wykonany z różnych profili zimnogiętych: C50, C75, i C100. Badano ściany bez wypełnienia oraz ściany wypełnione różnego rodzaju materiałem dźwiękochłonnym. Jako okładziny zastosowano płyty gipsowo-kartonowe grubości 12,5 mm o różnej masie powierzchniowej (w jednym przypadku zastosowano płyty o grubości 15 mm). Dodatkowe ustroje izolacyjne wykonano na ścianie z ceramiki poryzowanej oraz na ścianie z betonu komórkowego.

4.2. Metoda prowadzenia badań

Badania przeprowadzono w okresie dwóch lat 2005–2006 na stanowisku Zakładu Akustyki ITB złożonym z dwóch komór pogłosowych z ograniczonym przenoszeniem bocznym, spełniających wymagania PN-EN ISO 140-1:1999. Obie komory mają nieregularny kształt, co ogranicza wpływ zjawisk modalnych związanych z wymiarami komór na wynik pomiaru. Do pomiarów izolacyjności akustycznej właściwej zastosowano standardowy układ pomiarowy złożony z zespołu głośników emitujących różowy szum, dwóch obrotowych mikrofonów oraz analizatora Norsonik N121. Pomiary prowadzono zgodnie z PN-EN 20140-3:1999. Pomiary drgań wykonano za pomocą wibrometru

laserowego, wykorzystując do pobudzenia ścian ten sam układ nagłaśniający, jak w przypadku badań standardowych. Zastosowanie wibrometru laserowego pozwala uniknąć problemów związanych z doбором i sposobem montażu czujników drgań wykorzystywanych przy tradycyjnej metodzie pomiarowej [11].

W przypadku każdej przegrody wykonano standardowy pomiar poziomu ciśnienia akustycznego w pomieszczeniu nadawczym i odbiorczym, pomiar czasu pogłosu oraz pomiar poziomu prędkości drgań w 30–35 punktach usytuowanych na powierzchni ściany po stronie komory odbiorczej (rys. 3). Punkty były umieszczone w dwóch rzędach w odległości 50 cm i 100 cm od dolnej krawędzi ściany na słupkach i w środku rozpiętości płyty pomiędzy słupkami oraz dodatkowo w środkowej części ściany.



Rys. 3. Rozmieszczenie punktów do pomiaru drgań
Fig. 3. Distribution of vibration measurement points over the wall surface

W każdym przypadku poddano analizie wyniki pomiarów uzyskane w pasmach tercjowych w zakresie 50–5000 Hz. Dla wybranych próbek zarejestrowano również wartości w pasmach poniżej 50 Hz, które posłużą do przeprowadzenia odrębnej analizy dotyczącej zachowania tych ścian w zakresie niskich częstotliwości. Wartości wskaźników jednoliczbowych były obliczane w standardowym zakresie 100–3150 Hz.

Ściany szkieletowe z płyt gipsowo-kartonowych mają pod względem akustycznym niejednorodną konstrukcję. Występują różne drogi transmisji dźwięku przez poszczególne elementy ściany [12, 13]. W pierwszej fazie badań przeprowadzono szczegółową analizę wyników uzyskanych w poszczególnych punktach pomiarowych usytuowanych na powierzchni ściany. Zostały wyróżnione punkty położone na słupkach i na płycie pomiędzy słupkami, na wkrętach mocującym płytę gipsowo-kartonową do szkieletu i pomiędzy wkrętami oraz punkty położone w części środkowej i na obwodzie ściany. Wyniki uzyskane dla tych punktów zostały pogrupowane i uśrednione. Przeprowadzona analiza nie wykazała wyraźnych tendencji ani istotnego zróżnicowania poziomów drgań zależnie

od położenia punktu pomiarowego. Wnioski z analizy wykonanej w tym zakresie, dotyczącej pierwszych czterech ścian zbudowanych na pojedynczym szkielecie z profili C50, zostały przedstawione w artykule [14]. Późniejsze badania pozostałych przegród potwierdziły słuszność tych wniosków [15]. Mają one bardzo istotne znaczenie praktyczne. Wskazują, że pomimo niejednorodnej konstrukcji ściany i różnych dróg transmisji dźwięku energia akustyczna w pomieszczeniu odbiorczym jest promieniowana równomiernie przez całą powierzchnię przegrody. W przypadku prowadzenia terenowych badań izolacyjności akustycznej w budynku lokalizacja punktów pomiarowych może więc być przypadkowa, nie ma konieczności identyfikacji położenia poszczególnych elementów konstrukcyjnych ściany szkieletowej, co w zrealizowanym i wykończonym budynku jest kłopotliwe i czasochłonne. Stosunkowo dobra jednorodność wyników uzyskiwanych na powierzchni ściany wskazuje również na możliwość ograniczenia liczby punktów pomiarowych.

Wstępna analiza kolejnych wyników badań ścian szkieletowych o różnej konstrukcji wykazała, że występuje istotne zróżnicowanie współczynnika promieniowania w zależności od konstrukcji ściany oraz że występują w tym zakresie wyraźne tendencje. Czynnikiem różnicującym wyniki był głównie rodzaj i sztywność szkieletu oraz obecność lub brak wypełnienia ściany materiałem dźwiękochłonnym. Na podstawie tych obserwacji do osobnej analizy wyodrębniono następujące grupy przegród:

- ściany na pojedynczym szkielecie z wypełnieniem i bez wypełnienia materiałem dźwiękochłonnym,
- ściany na podwójnym szkielecie z wypełnieniem i bez wypełnienia materiałem dźwiękochłonnym,
- dodatkowe ustroje izolacyjne z płyt gipsowo-kartonowych stosowane na ścianach masywnych.

W każdej grupie, dla każdej rozpatrywanej przegrody obliczono średnią wartość poziomu prędkości drgań ze wszystkich punktów pomiarowych zlokalizowanych na powierzchni ściany, według wzoru

$$L_{v,avg} = 10 \log \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{L_{v,i}} \quad (24)$$

gdzie: $L_{v,i}$ – poziom drgań w i -tym punkcie pomiarowym, $v_0 = 10^{-9}$ m/s, dB
 $L_{v,avg}$ – wartość średnia poziomu drgań, dB,
 n – liczba punktów pomiarowych.

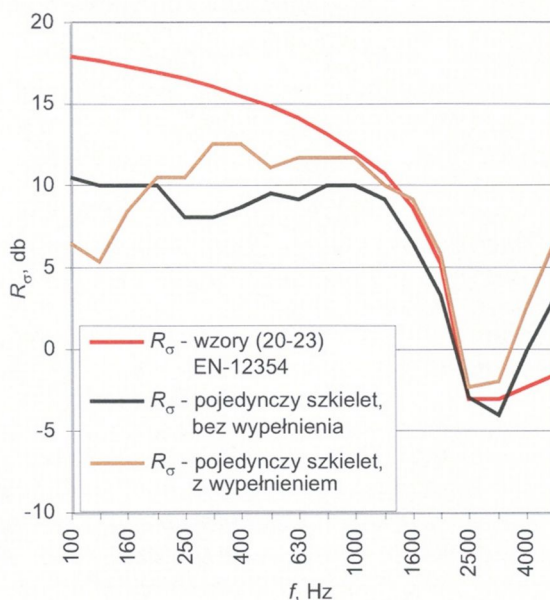
Dla każdej przegrody na podstawie wyników standardowego pomiaru izolacyjności akustycznej właściwej oraz uśrednionych według wzoru (23) wyników pomiaru drgań obliczono indywidualnie wartości współczynnika promieniowania w funkcji częstotliwości w pasmach tercjowych 50–5000 Hz, korzystając ze wzoru (4). Następnie wartości współczynnika promieniowania obliczone indywidualnie dla poszczególnych ścian zostały uśrednione w obrębie każdej grupy konstrukcyjnej. Uzyskane w ten sposób wartości średnie przyjęto jako wartości współczynnika promieniowania reprezentatywne dla danej grupy ścian.

Uśrednione wartości współczynnika promieniowania zastosowano przy obliczaniu krzywych izolacyjności akustycznej drganiowej R_v według wzoru (5), a następnie jednoczłonowych wskaźników oceny $R_{v,w}$ (C_v ; $C_{v,tr}$), które zostały porównane z wynikami standardowego pomiaru izolacyjności akustycznej właściwej R_w (C ; C_{tr}). Poniżej przedstawiono syntezę wyników uzyskanych w obrębie każdej z rozpatrywanych grup.

5. Wyniki badań, praktyczna wartość współczynnika promieniowania

5.1. Ściany na pojedynczym szkielecie

Zbiór ścian wykonanych na pojedynczym szkielecie obejmował 14 przegród o różnej konstrukcji. Wyodrębniono w nim grupę pięciu ścian bez wypełnienia materiałem dźwiękochłonnym i grupę dziewięciu ścian wypełnionych wełną mineralną. Ustalone w wyniku przeprowadzonych badań średnie wartości izolacyjności akustycznej promieniowania dla każdej z tych grup pokazano na rysunku 4. Obie krzywe różnią się głównie w rejonie częstotliwości rezonansowej występującej w zakresie niskich częstotliwości, oraz w rejonie częstotliwości koincydencji 2500–3150 Hz, gdzie wartość współczynnika promieniowania raptownie wzrasta (rys. 4). Porównując wyniki uzyskane na podstawie badań empirycznych z krzywymi teoretycznymi zestawionymi na rysunku 2, można dostrzec bardzo wyraźne różnice, związane głównie z występowaniem tłumienia wewnętrznego, które nie jest uwzględnione we wzorach teoretycznych. Podobny charakter ma krzywa izolacyjności promieniowania uzyskana dla pojedynczej płyty gipsowo-kartonowej o grubości 13 mm przy jej punktowym pobudzeniu mechanicznym do drgań [6].



Rys. 4. Izolacyjność akustyczna promieniowania $R_{\sigma} = 10 \log (1/\sigma)$ dla ścian na pojedynczym szkielecie
 Fig. 4. Radiation coefficient $R_{\sigma} = 10 \log (1/\sigma)$ for single framework gypsum plasterboard walls, empirical values

Tablica 1. Wskaźniki izolacyjności akustycznej ścian pojedynczych bez wypełnienia
 Table 1. The values of sound insulation indicators for single frame-work walls without absorption

Nr ściany	Szkielet	Oplytowanie	Wypełnienie	$R_w(C; C_{tr})$ dB	$R_{v,w}(C_v; C_{v,tr})$ dB
1	C50	1 × 12,5 mm C	–	38 (-1; -6)	37 (-1; -7)
4	C50	1 × 12,5 mm	–	35 (-2; -6)	35 (-1; -6)
11	C75	1 × 12,5 mm	–	38 (-2; -7)	38 -2; -7)
10	C100	1 × 12,5 mm	–	37 (-1; -7)	37 (-1; -7)
7	C100	1 × 12,5 mm C	–	41 (-1; -5)	40 (-2; -7)

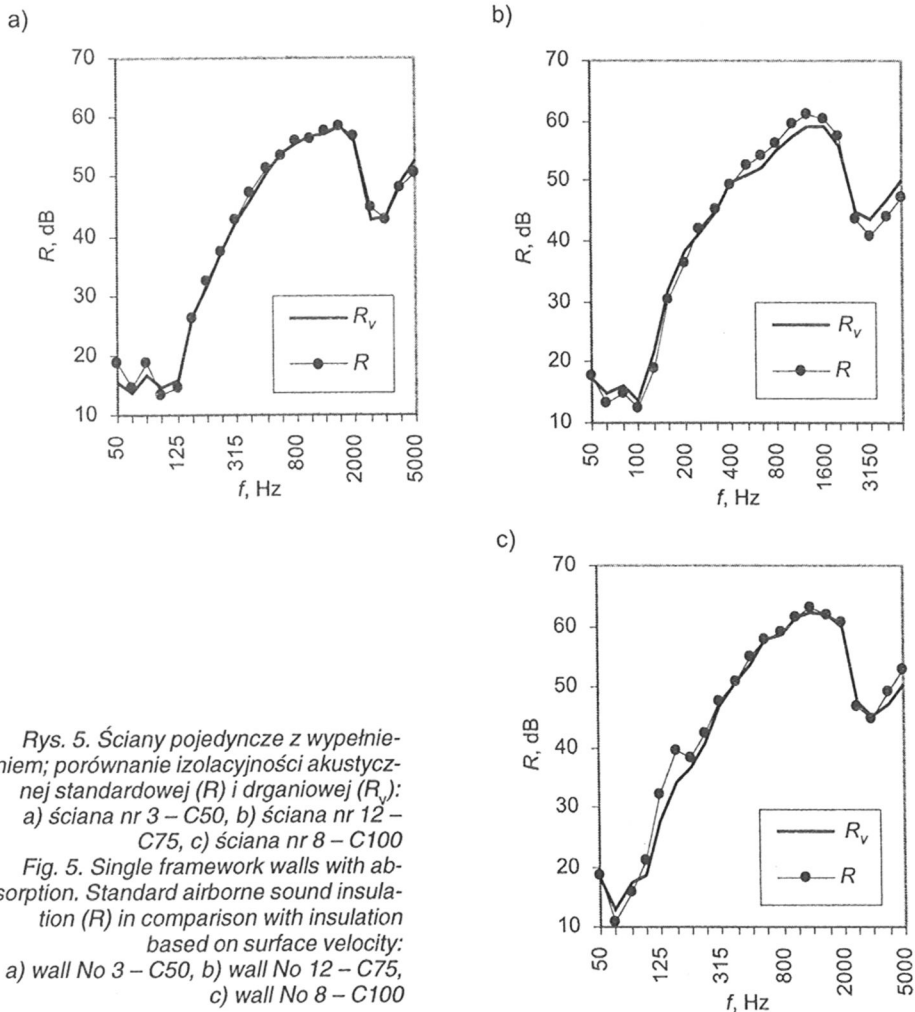
Tablica 2. Wskaźniki izolacyjności akustycznej ścian pojedynczych z wypełnieniem
 Table 2. The values of sound insulation indicators for single frame-work walls with absorption

Nr ściany	Szkielet	Oplytowanie	Wypełnienie	$R_w(C; C_{tr})$ dB	$R_{v,w}(C_v; C_{v,tr})$ dB
2	C50	1 × 12,5 mm C	50 mm (Sz)	47 (-5; -13)	47 (-5; -12)
3	C50	1 × 12,5 mm	50 mm (Sz)	42 (-5; -11)	42 (-4; -10)
16	C50	1 × 12,5 mm	50 mm (Sk)	41 (-3; -10)	44 (-3; -10)
19	C50	1 × 15 mm	50 mm (Sz)	47 (-5; -13)	48 (-6; -14)
12	C75	1 × 12,5 mm	75 mm (Sz)	43 (-4; -12)	45 (-4; -12)
8	C100	1 × 12,5 mm C	100 mm (Sz)	50 (-3; -10)	48 (-3; -10)
14	C100	1 × 12,5 mm	80 mm (Sk)	45 (-4; -12)	45 (-4; -12)
15	C100	2 × 12,5 mm	80 mm (Sk)	51 (-3; -9)	49 (-3; -10)
18	C100	2 × 12,5 mm	80 mm (Sk)	47 (-2; -8)	47 (-3; -9)

W tablicy 1 zestawiono wartości jednoliczbowych wskaźników izolacyjności akustycznej pięciu ścian na pojedynczym szkielecie bez wypełnienia materiałem dźwiękochłonnym. Wskaźniki zostały obliczone na podstawie charakterystyk częstotliwościowych uzyskanych w wyniku pomiaru standardowego $R_w(C; C_{tr})$ oraz pomiaru drgań $R_{v,w}(C_v; C_{v,tr})$ z wykorzystaniem ustalonych średnich wartości współczynnika promieniowania (rys. 4). Rozpatrywane ściany miały szkielet wykonany z profili C50, C75 lub C100. Jako okładziny zastosowano pojedyncze płyty zwykłe (GKB) o ciężarze średnio 9,05 kg/m² oraz specjalne ciężkie płyty (12 kg/m²) oznaczone w tablicy literą C. Jest wyraźnie widoczne, że w przypadku ścian bez wypełnienia materiałem dźwiękochłonnym, pomimo ich różnej konstrukcji, ustalone wartości średnie współczynnika promieniowania dają bardzo dobrą zgodność wyników standardowych i wyników opartych na pomiarze drgań. Dobra zgodność występuje zarówno w poszczególnych pasmach częstotliwości, jak też w odniesieniu do wartości jednoliczbowych wskaźników oceny. Wartości wskaźników R_w i $R_{v,w}$

są takie same lub różnią się o 1 dB. W przypadku wskaźników R_{A1} ($R_{A1} = R_w + C$) zgodność jest podobna, z wyjątkiem ściany nr 7, gdzie różnica wynosi 2dB.

W warunkach rzeczywistych ściany szkieletowe bez wypełnienia materiałem dźwiękochłonnym są stosowane stosunkowo rzadko. Najczęściej wykonuje się ściany na pojedynczym szkielecie z wypełnieniem wełną mineralną, szklaną lub skalną. Tego typu przegrody stanowiły największą badaną grupę (9 ścian). Uśredniona charakterystyka izolacyjności akustycznej promieniowania ustalona dla tej grupy ścian w wyniku przeprowadzonych badań została pokazana na rysunku 4. Jednoliczbowe wskaźniki oceny izolacyjności akustycznej obliczone na podstawie wyników pomiarów drgań oraz wskaźniki określone metodą standardową zestawiono w tabelicy 2.



Rys. 5. Ściany pojedyncze z wypełnieniem; porównanie izolacyjności akustycznej standardowej (R) i drganiowej (R_v): a) ściana nr 3 – C50, b) ściana nr 12 – C75, c) ściana nr 8 – C100
 Fig. 5. Single framework walls with absorption. Standard airborne sound insulation (R) in comparison with insulation based on surface velocity: a) wall No 3 – C50, b) wall No 12 – C75, c) wall No 8 – C100

Różnice między wynikami standardowymi i obliczonymi na podstawie pomiaru drgań są generalnie większe niż w przypadku ścian pojedynczych bez wypełnienia. Należy jednak pamiętać, że zróżnicowanie konstrukcji w rozpatrywanej grupie ścian z wypełnieniem wełną mineralną było bardzo duże. Uwzględniono ściany na szkielecie z profili C50, C75 lub C100. Wypełnienie stanowiła wełna szklana (Sz) lub wełna skalna (Sk) o różnej grubości i różnej gęstości. Jako okładziny stosowano pojedyncze i podwójne płyty gipsowo-kartonowe o różnym ciężarze. Jedna ze ścian miała okładziny wykonane z płyt o innej grubości: 15 mm.

Na rysunku 5 pokazano przykładowe zestawienia charakterystyk izolacyjności akustycznej standardowej (R) i uzyskanej na podstawie pomiaru drgań (R_v) dla trzech ścian pojedynczych na szkielecie C50, C75 i C100, całkowicie wypełnionych wełną szklaną o grubości odpowiednio 50 mm, 75 mm i 100 mm. Zgodność przebiegu wykresów jest we wszystkich przypadkach bardzo wyraźna.

5.2. Ściany na podwójnym szkielecie

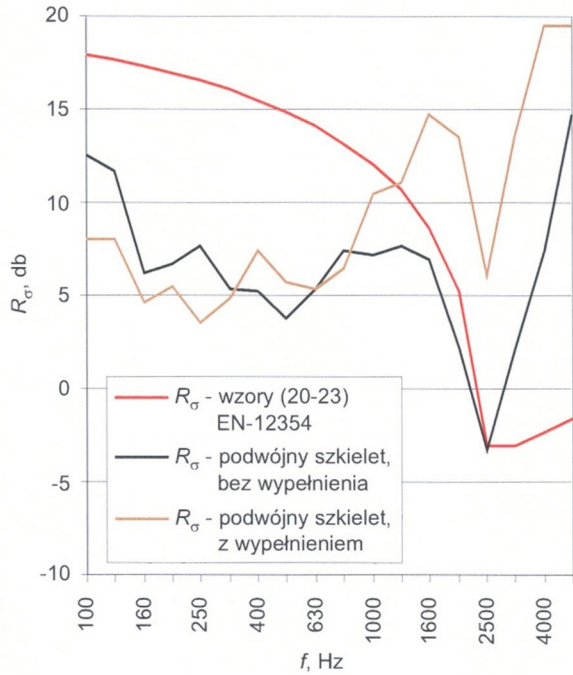
Wartości współczynnika promieniowania przegród na podwójnym szkielecie są nieco inne niż w przypadku przegród pojedynczych (rys. 6). Większe zróżnicowanie występuje też między przegrodami podwójnymi z wypełnieniem i bez wypełnienia wełną mineralną, zwłaszcza w rejonie częstotliwości koincydencji. Przegrody podwójne mają pod względem akustycznym inny schemat konstrukcyjny niż ściany pojedyncze. Płyta gipsowo-kartonowa jest zamocowana do profilu szkieletu tylko po jego jednej stronie, cała konstrukcja ściany i samo zamocowanie płyty do słupka jest więc mniej sztywne niż w przypadku ścian pojedynczych. Sztywne zamocowanie krawędzi płyty powoduje wzrost promieniowania energii akustycznej nawet dwukrotny w porównaniu z krawędzią swobodną [6].

Wartości wskaźników oceny izolacyjności akustycznej obliczone na podstawie wyników badań standardowych i pomiaru drgań dla czterech ścian na podwójnym szkielecie zestawiono w tablicy 3. Badano dwie ściany bez wypełnienia oraz dwie z wypełnieniem wełną mineralną. W przypadku ścian 5 i 6 wykonano szkielet mijankowy z profili C50, w pozostałych ścianach zastosowano szkielet bliźniaczy z profili $2 \times C50$ i $2 \times C75$. Zgodność wartości wskaźników standardowych i drganowych jest bardzo dobra.

Tablica 3. Wskaźniki izolacyjności akustycznej ścian podwójnych
Table 3. The values of sound insulation indicators for double framework walls

Nr ściany	Szkielet	Oplytowanie	Wypełnienie	$R_w(C; C_{tr})$ dB	$R_{v,w}(C_v; C_{v,tr})$ dB
5	S2 \times C50	2 \times 12,5 mm	–	45 (–1; –7)	45 (–1; –7)
6	S2 \times C50	2 \times 12,5 mm C	–	49 (–2; –6)	49 (–2; –6)
13	2 \times C50	2 \times 12,5 mm	2 \times 50 mm (Sk)	62 (–3; –10)	61 (–3; –11)
17	2 \times C75	2 \times 12,5 mm	2 \times 50 mm (Sk)	62 (–3; –10)	63 (–3; –11)

Rys. 6. Izolacyjność akustyczna promieniowania $R_{\sigma} = 10 \log(1/\sigma)$ obliczona dla ścian na podwójnym szkielecie
 Fig. 6. Radiation coefficient $R_{\sigma} = 10 \log(1/\sigma)$ for double framework plaster-board walls, empirical values



5.3. Ustroje izolacyjne na ścianach masywnych

W przypadku dodatkowych ustrojów izolacyjnych na ścianach masywnych przyjęto takie same wartości współczynnika promieniowania, jak dla ścian szkieletowych podwójnych z wypełnieniem wełną mineralną, ponieważ schemat dostawionego ustroju jest bardzo podobny, jak w przypadku jednej części ściany podwójnej. Wyniki obliczeń zestawiono w tabelicy 4.

Tabela 4. Wskaźniki izolacyjności akustycznej ścian masywnych z okładzinami
 Table 4. The values of sound insulation indicators for massive walls with acoustical lining

Nr ściany	Ściana masywna	Okładzina	$R_w (C; C_{tr})$ dB	$R_{v,w} (C_v; C_{v,tr})$ dB
21	ceramika por. 25 cm	OI (wełna + 1 × 12,5 mm)	58 (-2; -7)	61 (-2; -6)
22	beton komórkowy 24 cm	OII (wełna + 1 × 12,5 mm)	57 (-2; -8)	54 (-1; -7)
23	beton komórkowy 24 cm	OIII (wełna + 2 × 12,5 mm)	57 (-1; -6)	59 (-1; -6)

6. Podsumowanie

Zebrano bardzo bogaty materiał empiryczny w zakresie izolacyjności akustycznej lekkich ścian szkieletowych z płyt gipsowo-kartonowych ustalonej na postawie pomiaru

prędkości drgań na powierzchni ściany. Dotychczasowe doświadczenia w tym zakresie były niewielkie – metodę opartą na pomiarze drgań wykorzystywano głównie do badań akustycznych jednorodnych przegród masywnych.

Ze względu na objętość materiału, w artykule przedstawiono głównie syntezę wyników w postaci zestawień obliczonych wartości wskaźników jednolicebnych. Podano tylko przykładowe wykresy izolacyjności akustycznej. Analiza przebiegu samych wykresów, zwłaszcza w zakresie niskich częstotliwości, będzie przedmiotem odrębnego artykułu.

Ustalone w wyniku przeprowadzonych badań wartości współczynnika promieniowania dają dobrą zgodność izolacyjności akustycznej ustalonej na podstawie pomiaru drgań z wynikami badań standardowych. Mogą być one wykorzystane do identyfikacji dróg transmisji dźwięku w budynku oraz przy szacunkowej ocenie izolacyjności akustycznej ścian szkieletowych z płyt gipsowo-kartonowych w warunkach rzeczywistych.

Bibliografia

- [1] Fasold W. & Sonntag E.: *Bauphysikalische Entwurfslehre*. Band 4. Bauakustik. Veb Verlag für Bauwesen, Berlin 1972
- [2] Szudrowicz B.: *Boczne przenoszenie dźwięków powietrznych przez przegrody budowlane*. Seria: Prace naukowe Instytutu Techniki Budowlanej. ITB, Warszawa 1996
- [3] Heckl M., Müller H. A.: *Taschenbuch der Technischen Akustik*. Springer, Berlin 1975
- [4] Engel Z.: *Ochrona środowiska przed drganiami i hałasem*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2001
- [5] EN12354-1 *Building Acoustics – Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements*
- [6] Cremer L., Heckl M.: *Körperschall Physikalische Grundlagen und technische Anwendungen*. 2. völlig Neubearbeitete Auflage. Springer, 1996
- [7] Maidanik, G.: *Response of ribbed panels to reverberant acoustic fields*, *JASA* 34 (1962), pp. 809–826
- [8] Sewell, E.C.: *Transmission of reverberant sound through a single-leaf partition surrounded by an infinite rigid baffle*, *Journal of Sound and Vibration* 12 (1970), pp. 21–32
- [9] Novak, R. A.: *Radiation from partially excited plates*, *Acta Acustica* 3 (1995), pp. 561–567
- [10] Villot M., Guigou-Carter C.: *Prediction method adapted to lightweight constructions and related laboratory characterizations*. Materiały konferencyjne „Forum Acusticum” 2005, pp. 1949–1954
- [11] Fausti P., Secchi S., Gualandi M.: *Vibration Velocity Technique for sound reduction index measurement*. Materiały konferencyjne „Euronoise Naples” 2003
- [12] Craik R.J.M. & Smith R.S. 2000. *Sound transmission through double leaf lightweight partitions. Part I: Airborne sound*. *Applied Acoustics* 61, pp. 223–245
- [13] Craik, R.J.M. & Smith, R.S. 2000. *Sound transmission through lightweight parallel plates. Part II: structure-borne sound*. *Applied Acoustics* 61, pp. 247–269
- [14] Nurzyński J. 2006 *Acoustic performance of lightweight plasterboard walls, empirical study on the effect of plasterboard fixing conditions in P. Fazio, H. Ge, J. Rao, G. Desmarais. Research in Building Physics and Building engineering*. Taylor & Francis/Balkema GB 2006, pp. 819–826

- [15] Nurzyński J.: Sound insulation of plasterboard frame walls based on the surface velocity level measurements. Materiały konferencyjne ICA 2007, Madrid, September 2007

RADIATION EFFICIENCY OF LIGHTWEIGHT GYPSUM PLASTERBOARD WALLS

Summary

Radiation efficiency plays essential role when determining the sound insulation of a specific partition in a building based on surface velocity level measurements. In the case of massive walls and floors it is a pure value of about 1 above the critical frequency, but for lightweight plasterboard partitions it is not precisely known. Theoretical dependencies give results which are not precise enough for practical use. The paper presents results of investigation on radiation efficiency for frame plasterboard walls based on standard laboratory sound insulation tests and vibration velocity level measurements taken on 18 different lightweight partition and 3 massive walls with acoustical lining made of plasterboard panels supported on separate frame. As an effect the values of radiation coefficient for walls with different structure were determined. The values can be useful when tracing sound transmission paths in a building.

Praca wpłynęła do Redakcji 30 XI 2007 r.