

dr inż. WITOLD MIKULSKI

Centralny Instytut Ochrony Pracy
– Państwowy Instytut Badawczy

Kontakt: wimik@ciop.pl

mgr inż. IZABELA WARMIAK

Kontakt: izabelawarmiak@gmail.com

DOI: 10.5604/01.3001.0009.9601

Stosowanie ekranów akustycznych w pomieszczeniach

Fot. Alona Step/Bigstockphoto



W artykule omówiono sposoby zastosowania ekranów akustycznych w pomieszczeniach. Stosuje się je jako: częściową obudowę lub osłonę źródła hałasu, przeszkodę dla hałasu dochodzącego bezpośrednio od źródła hałasu do stanowiska pracy, do podziału pomieszczenia na dwie części odseparowane akustycznie oraz jako element zwiększający chłonność akustyczną pomieszczenia. Podano parametry akustyczne określające skuteczność ekranów akustycznych. Określono związek klasy pochłaniania dźwięku materiałów ze współczynnikiem pochłaniania dźwięku α . Na podstawie konkretnego przykładu obliczono,

o ile zmniejszy się poziom dźwięku A po zastosowaniu ekranów akustycznych. Określono także ogólne zalecenia akustyczne dotyczące stosowania ekranów w pomieszczeniach.

Słowa kluczowe: ekran akustyczny, adaptacja akustyczna, chłonność akustyczna, obudowa dźwiękoizolacyjna

The use of acoustic screens indoors

This article discusses the use of acoustic screens in rooms. They are used to partially enclose or cover a noise source, to provide an obstacle to noise coming directly from a noise source to a workstation, to divide a room into acoustically separated parts and to increase sound absorption in a room. This article discusses acoustic parameters that determine the effectiveness of acoustic screens and establishes the relationship between the sound absorption class of materials and sound absorption coefficient α . It presents a sample calculation of how the use of acoustic screens reduces A-weighted sound pressure level and it presents general acoustical recommendations for the use of acoustic screens in rooms.

Keywords: acoustic screen, acoustic treatment, sound absorption, soundproofing enclosure, sound-insulating cover

Wstęp

Ekranem akustycznym nazywa się obiekt specjalnie zaprojektowany do osłonięcia co najmniej jednego określonego miejsca pewnego obszaru (np. miejsca pracy, w którym znajduje się pracownik) przed hałasem emitowanym (promieniowanym) z określonego źródła lub źródeł dźwięku (wg PN-EN ISO 17624, [1]). Ele-

ment ten uniemożliwia dojście hałasu do tego obszaru z pewnego kierunku. W przypadku, gdy źródło hałasu znajduje się po jednej stronie ekranu akustycznego, to po drugiej (za nim), fala akustyczna od tego źródła nie będzie dochodzić drogą bezpośrednią.

W przestrzeni otwartej do obszaru za ekranem dochodzi fala akustyczna przenikająca bezpośrednio przez ekran akustyczny (jako prze-

godę – zjawisko refrakcji) oraz fala/e ugięta/e na krawędziach ekranu (fala ugięta). Skuteczność zmniejszenia energii akustycznej przenikającej przez ekran określa się izolacyjnością akustyczną ekranu lub według normy wskaźnikiem redukcji dźwięku, lub tłumieniem przenoszenia R [1].

Izolacyjność akustyczna większości praktycznie zastosowanych ekranów akustycznych jest duża (powyżej 20 dB). Falę przenikającą przez ekran można wówczas pominąć, ponieważ ma ona znikomy wpływ na wypadkowy hałas po drugiej stronie ekranu (energia akustyczna fali przenikającej przez ekran jest znacznie mniejsza niż energia akustyczna fali ugiętej). W większości praktycznych zastosowań ugięcie się fali akustycznej uwzględnia się na krawędzi górnej i bocznych ekranu. W przypadku, gdy ekran akustyczny nie styka się z podłożem (jest przeświet) fala akustyczna promieniowana przez źródło przechodzi także pod ekranem (fala przeniesiona), [1]. W pomieszczeniu fale akustyczne będą dodatkowo dochodzić do obszaru za ekranem akustycznym po odbiciu się od ścian, podłogi i stropu (fale odbite).

Te wszystkie drogi propagacji fali akustycznej powodują, że skuteczność ekranu akustycznego w pomieszczeniu jest dużo mniejsza niż w przestrzeni otwartej. Dlatego stosowanie ekranów akustycznych w pomieszczeniach jest efektywne akustycznie tylko w niewielkiej liczbie przypadków.

W artykule omówiono zalecenia dotyczące stosowania ekranów akustycznych w pomieszczeniach.

Cel stosowania ekranów akustycznych

Wpływ ekranu akustycznego na hałas w pomieszczeniu zależy od miejsca, w którym się go określa, a miejsce to nazywa się punktem obserwacji. Skuteczność ekranu akustycznego określana jest stopniem zmniejszenia poziomu ciśnienia akustycznego w pasmach częstotliwości (lub poziomu dźwięku A) w obszarze, który jest osłaniany. Skuteczności ekranu akustycznego

nie można określić za pomocą jednej zależności, gdyż wynika ona nie tylko z właściwości ekranu, ale także zależy od widma dźwięku emitowanego ze źródła akustycznego, właściwości akustycznych pomieszczenia oraz wzajemnego położenia wszystkich elementów, czyli źródła, punktu obserwacji, ekranu akustycznego i pomieszczenia.

Cele stosowania ekranu akustycznego to:

I. Pochłanianie hałasu emitowanego (promienionego) przez źródło do otoczenia – ekran akustyczny jako częściowa obudowa, osłona źródła.

II. Uniemożliwienie propagacji hałasu bezpośrednio od źródła do punktu obserwacji – w przestrzeni otwartej propagacja zachodzi tylko drogą bezpośrednią, a skuteczność zastosowania ekranu akustycznego jest duża. W typowych pomieszczeniach (zamkniętych) ekran akustyczny będzie skuteczny głównie w odniesieniu do fali bezpośredniej. Ponieważ prawie w całym obszarze pomieszczeń (tj. w odległości większej od promienia granicznego pomieszczenia r_g ; wg wzoru 1) poziom dźwięku fal odbitych jest większy od poziomu dźwięku fali bezpośredniej, skuteczność ekranu będzie mała (najwyżej kilka decybeli). W pomieszczeniach o dużym pochłanianiu dźwięku przez ściany, sufit i podłogę (duża chłonność akustyczna, mały czas pogłosu, duży promień graniczny pomieszczenia r_g), prawie w całym obszarze pomieszczenia poziom dźwięku fali bezpośredniej będzie większy od poziomu dźwięku fal odbitych – wówczas skuteczność ekranu akustycznego będzie średnia lub duża (tj. znacznie powyżej 3 dB).

III. Podział „akustyczny” pomieszczenia na dwie (lub więcej) części, tj. stworzenie dwóch obszarów po obu stronach ekranu odseparowanych akustycznie. Skuteczność takiego rozwiązania zależy od właściwości pochłaniających obu części pomieszczenia, wielkości ekranu, prześwitu wokół niego oraz współczynnika pochłaniania dźwięku materiału na powierzchniach ekranu.

IV. Wniesienie dodatkowej chłonności akustycznej (spowodowanie wytłumienia fal akustycznych padających na powierzchnie ekranu) – efekt ten ma znaczenie w nielicznych przypadkach, tj. wtedy, gdy jednocześnie: chłonność akustyczna pomieszczenia jest mała, wymiary ekranu są duże oraz współczynnik pochłaniania dźwięku materiału na powierzchniach ekranu jest bardzo duży (w zakresie 0,8 – 1; patrz niżej). Ten sposób oddziaływania przy określaniu skuteczności ekranu akustycznego należy uwzględnić poprzez zwiększenie chłonności akustycznej pomieszczenia [2].

Oczywiście, wszystkie wymienione efekty zachodzą w każdym przypadku, jednakże w zależności od konfiguracji tych elementów, można wyróżnić dominujący wpływ jednego z nich.

Skuteczność ekranu akustycznego w pomieszczeniu określa wtrąceniowa różnica poziomów dźwięku A , D_{pt} (także wtrąceniowa różnica poziomów ciśnienia akustycznego D_{pt}),

będąca różnicą poziomów dźwięku A z ekranem i bez ekranu (odpowiednio poziomemu ciśnieniu akustycznego).

Poniżej omówimy stosowanie ekranów w przypadkach I – III.

Pochłanianie hałasu emitowanego przez źródło do otoczenia

Jeżeli w pomieszczeniu znajduje się dominujące źródło hałasu, to najskuteczniejszym sposobem zmniejszenia hałasu (w tym na stanowiskach pracy) jest umieszczenie tego źródła w obudowie dźwiękochłonna-izolacyjnej (dźwiękoizolacyjnej). Skuteczność takiego rozwiązania to redukcja hałasu o 10-30 dB.

W przypadkach, gdy obudowy nie można zastosować, to najbardziej skuteczne zmniejszenie hałasu (określane poziomem dźwięku A) można uzyskać przez zastosowanie ekranu akustycznego, umieszczonego w sąsiedztwie źródła hałasu (np. w postaci częściowej osłony źródła). Ekran akustyczny powinien osłaniać jak największą część źródła, a szczególnie ten jego fragment, który emituje najwięcej hałasu. Od strony źródła ekran akustyczny powinien być pokryty materiałem dźwiękochłonnym o klasie pochłaniania dźwięku A lub B (tab. 1.), lecz o nie mniejszym współczynniku pochłaniania dźwięku niż 0,8 w paśmie częstotliwości, w którym źródło emituje największy hałas (im większa jest wartość współczynnika pochłaniania dźwięku α materiału, tym materiał bardziej pochłania (tłumi) dźwięki [3,4,5]).

Tabela 1. Klasy pochłaniania dźwięku materiałów wg PN-EN ISO 11654 [6]

Table 1. Sound absorption classes of materials according to standard EN ISO 11654 [6]

Ważony współczynnik pochłaniania dźwięku α_w *	Klasy pochłaniania dźwięku
0,90-1,00	A
0,80-0,85	B
0,60-0,75	C
0,30-0,55	D
0,15-0,25	E
0,00-0,10	Nieklasfikowane

*Ważony współczynnik pochłaniania dźwięku α_w jest obliczany z wartości współczynników pochłaniania dźwięku α we wszystkich pasmach częstotliwości wg PN-EN ISO 11654 [6]

Wielkością, która określa skuteczność ekranu akustycznego jako elementu pochłaniającego energię akustyczną emitowaną przez źródło do otoczenia jest tłumienie wtrącenia D_t .

Tłumienie wtrącenia D_t to różnica między poziomami mocy akustycznej emitowanej do pomieszczenia przez źródło dźwięku bez ekranu akustycznego i z nim (określane w oktaowych lub 1/3 oktaowych pasmach częstotliwości,

D_{tr}). Oczywiście wtrąceniowa różnica poziomów ciśnienia akustycznego D_{pt} jest w większości przypadków mniejsza od tłumienia wtrącenia D_{tr} , ponieważ tylko część źródła jest osłonięta ekranem akustycznym. Skuteczność ekranu określona wtrąceniową różnicą poziomów dźwięku A , D_{pt} , dodatkowo zależy od pasma częstotliwości, w którym źródło wytwarza największy hałas. Maksymalna skuteczność takiego ekranu akustycznego może być porównywana ze średnią skutecznością obudowy dźwiękochłonna-izolacyjnej.

Uniemożliwienie propagacji hałasu drogą bezpośrednią od źródła do obszaru za ekranem

W pomieszczeniu fala akustyczna promienioną przez źródło rozchodzi się prostoliniowo, tj. drogą bezpośrednią, aż do momentu natrafienia na przeszkodę (ściany, sufit, podłoga oraz elementy wnętrza, w tym ekrany akustyczne). Częściowo odbija się od tych przeszkód (refleksja) oraz ugina na elementach wnętrza (dyfrakcja). W wyniku tego zmieniają się kierunki dalszego rozchodzenia się fali akustycznej, a właściwie fal akustycznych, a energia akustyczna każdej z nich zmniejsza się na skutek pochłaniania podczas odbicia lub ugięcia. Podczas propagacji fal akustycznych następują kolejne odbicia oraz ugięcia i w wyniku tych procesów, w pomieszczeniu w czasie działania źródła znajduje się bardzo dużo rozproszonych i wymieszanych fal wielokrotnie odbitych i ugiętych. Można wtedy przyjąć, że w odległości od źródła większej od promienia granicznego pomieszczenia r_g (wzór 1), fal akustycznych jest tak wiele, że w każdym punkcie pomieszczenia poziom ciśnienia akustycznego jest zbliżony, a fale akustyczne dochodzą do każdego punktu obserwacji ze wszystkich kierunków (pole rozproszone, dyfuzyjne).

Poziom ciśnienia akustycznego fali bezpośredniej będzie maleć przy oddalaniu się od źródła, a w odległości równej promieniowi granicznemu pomieszczenia r_g (w literaturze oznaczany także r_g i nazywany promieniem krytycznym) będzie taki sam, jak poziom ciśnienia akustycznego fal odbitych. Można więc stwierdzić, że w odległości od źródła akustycznego mniejszej niż promień graniczny pomieszczenia wypadkowy hałas będzie zależał od hałasu bezpośrednio dochodzącego od źródła, a w odległości od źródła większej niż promień graniczny pomieszczenia, na wypadkowy hałas dominujący wpływ będzie miał hałas docierający po odbiciach i ugięciach. Ponieważ ekran akustyczny uniemożliwia dojsię hałasu tylko z jednej strony, stosowanie ekranu w odległości od źródła hałasu większej od promienia granicznego pomieszczenia (tj. w polu dyfuzyjnym) jest bardzo mało skuteczne. Szacuje się, że hałas wówczas może się zmniejszyć o co najwyżej 1 – 2 dB.

Promień graniczny pomieszczenia r , określa się (w odniesieniu do pomieszczeń sześciennych) wg [1], w metrach, ze wzoru:

$$r_r = \sqrt{\frac{A}{16\pi}} = 0,057 \sqrt{\frac{V}{T}} \quad (1)$$

gdzie:

A – chłonność akustyczna pomieszczenia, w m^2 [2]

V – objętość pomieszczenia, w m^3

T – czas pogłosu pomieszczenia, w sekundach, [2].

W sąsiedztwie źródła hałasu do odległości mniejszej niż promień graniczny pomieszczenia r , można wyróżnić wyraźnie kierunek, z którego energia akustyczna dochodzi ze źródła – można więc wówczas efektywnie zastosować ekran akustyczny. W tym obszarze skuteczność ekranu akustycznego określana jest analogicznie do sytuacji w przestrzeni otwartej.

Wielkością zastosowaną do oceny skuteczności ekranu jest wówczas tłumienie dźwięku ekranu akustycznego w polu swobodnym. Określa się je w pasmach częstotliwości f o szerokości oktawy lub 1/3 oktawy $D_{z,f}$ (można tu również określić tłumienie dźwięku ekranu akustycznego w polu swobodnym poziom dźwięku A , $D_{z,A}$).

Tłumienie dźwięku ekranu akustycznego w polu swobodnym $D_{z,f}$ w paśmie częstotliwości f , określa się wg [1], w dB, ze wzoru:

$$\begin{aligned} D_{z,f} &= 10 \cdot \log \left(3 + 40 \frac{z}{\lambda} \right) = \\ &= 10 \cdot \log \left(3 + 40 \frac{z \cdot f}{c} \right) = \\ &= 10 \cdot \log(3 + 0,12 \cdot f \cdot z) \quad (2) \end{aligned}$$

gdzie:

z – różnica długości między drogą, po której następuje najmniej efektywne ugięcie się fali akustycznej oraz drogą bezpośrednią źródło-punkt obserwacji bez uwzględnienia ekranu akustycznego

λ – długość fali akustycznej, w metrach

f – częstotliwość fali akustycznej, w Hz

c – prędkość dźwięku w powietrzu równa 340 m/s.

Wzór ten stosuje się, gdy ugięcie się fali akustycznej zachodzi na jednej krawędzi ekranu, a ugięcie się fali akustycznej na innych krawędziach ekranu ma pomijalne małe znaczenie (większość przypadków spotykanych w praktyce).

W przypadku, gdy źródło znajduje się w pobliżu ściany lub stropu pomieszczenia skuteczność ekranu maleje, a określa się ją zredukowanym tłumieniem dźwięku ekranu akustycznego $D_{z,r}$ (odpowiednio $D_{z,r,f}$ lub $D_{z,r,A}$). Zredukowane tłumienie dźwięku ekranu akustycznego $D_{z,r}$ w paśmie częstotliwości f o szerokości oktawy lub 1/3 oktawy określa się wg [1], w dB, ze wzoru:

$$\begin{aligned} D_{z,r,f} &= 10 \cdot \log \left(3 + 20 \frac{z}{\lambda} \right) = \\ &= 10 \cdot \log \left(3 + 20 \frac{z \cdot f}{c} \right) = \\ &= 10 \cdot \log(3 + 0,059 \cdot f \cdot z) \quad (3) \end{aligned}$$

gdzie oznaczenia jak wyżej.

W przypadkach, gdy ugięcie na krawędziach bocznych ekranu nie można pominąć, tłumienie dźwięku ekranu akustycznego w polu swobodnym $D_{z,i}$ w paśmie częstotliwości f , określa się w dB, wg wzoru [7]:

$$D_{z,f} = -10 \cdot \log \sum_{i=1}^n 10^{-\frac{D_{z,f,i}}{10}} \quad (4)$$

gdzie:

$D_{z,i}$ – tłumienie dźwięku ekranu akustycznego w polu swobodnym przy uwzględnieniu tylko ugięcia się fali akustycznej na i -tej krawędzi ekranu akustycznego. Oblicza się je, w dB, wg wzoru 2 (dla krawędzi górnej, bocznych i ewentualnie dolnej krawędzi ekranu)

n – liczba krawędzi ekranu, na których zachodzi ugięcie się fali akustycznej.

Wzór ten ma zastosowanie w dokładniejszych obliczeniach, np. za pomocą programów komputerowych. Widać także z niego, że skuteczność ekranu będzie tym większa, im mniej jest krawędzi ekranu, na których następuje ugięcie się fali akustycznej. Wynika z tego, że pod ekranem nie powinno być prześwitu, a ekran, o ile to możliwe, powinien także się stykać ze ścianami lub wyposażeniem pomieszczenia (np. szafkami). Ze wzorów tych widać również, że skuteczność ekranu akustycznego jest tym większa, im większa jest częstotliwość dźwięku f emitowanego przez źródło. Będzie ona także tym większa, im większa jest różnica odległości między drogą, po której następuje ugięcie się fali akustycznej oraz drogą bezpośrednią. Różnica odległości z kolei jest tym większa (co wynika z geometrii układu źródło – ekran akustyczny – punkt obserwacji), im:

- większy jest najmniejszy wymiar ekranu
- mniejsza jest odległość źródło – ekran
- mniejsza jest odległość ekran – punkt obserwacji.

Jak już powiedziano, skuteczność ekranu akustycznego w pomieszczeniu określona jest wtrąceniową różnicą poziomów dźwięku A , D_{pA} (także wtrąceniową różnicą poziomów ciśnienia akustycznego $D_{p,i}$) jako różnicą poziomów dźwięku A z i bez ekranu (odpowiednio poziomu ciśnienia akustycznego). Ponieważ poziom dźwięku A wynika zarówno z fali bezpośredniej, jak i odbitych i rozproszonych, to skuteczność ekranu określona wtrąceniową różnicą poziomów dźwięku A , D_{pA} (także wtrąceniową różnicą poziomów ciśnienia akustycznego $D_{p,i}$) będzie mniejsza od tłumienia dźwięku ekranu akustycznego w polu swobodnym D_{zA} (odpowiednio $D_{z,i}$).

Zwykle można je oszacować w całym paśmie częstotliwości, w dB, ze wzoru [1]:

$$D_{p,f} \approx D_{z,r,f} - 3 \div 5 \quad (5)$$

Podział akustyczny pomieszczenia ekranem na dwie części

W przypadkach, gdy pomieszczenie ma słabe właściwości dźwiękochłonne (mała chłonność akustyczna, długi czas pogłosu, mały promień graniczny pomieszczenia) lub silne właściwości dźwiękochłonne, ale jednocześnie występują w nim dominujące źródła hałasu, zasadne akustycznie jest zastosowanie ekranu akustycznego o bardzo dużych wymiarach. Ekran ten rozdzieli akustycznie pomieszczenie, jednakże nie będzie przegrodą akustyczną (pomiędzy ekranem a ścianami i stropem będzie wolna przestrzeń). Wynika to z faktu, że nadal do obszaru po drugiej stronie ekranu (po przeciwnej niż źródło) dominująca energia akustyczna dojdzie po ugięciu na jego krawędziach, a tylko nieznaczna energia akustyczna będzie przenikała przez ekran jako przez przegrodę. Ma to także szczególne znaczenie, gdy w pomieszczeniu można wydzielić strefy o różnych wymaganiach akustycznych, wynikających z różnych funkcji (kuchnia, część z głośnymi urządzeniami: drukarki, plotery, ksero, część, w której prowadzone są rozmowy, część do narad, część do odpoczynku).

Rozdzielenie akustyczne jest tym skuteczniejsze, im:

- mniejsza jest przestrzeń poza ekranem, przez którą przenika hałas między częściami pomieszczenia, tj. im mniejszy jest prześwit między ekranem, ścianami bocznymi i stropem (miarą prześwitu między ekranem i stropem jest stosunek wysokości ekranu h i wysokości pomieszczenia H tj., h/H)

- większa jest chłonność akustyczna przestrzeni za ekranem, do której przenika hałas

- części powierzchni ścian pomieszczenia najbliżej ekranu silnie pochłaniają dźwięk (duża wartość współczynnika pochłaniania dźwięku α)

- bliżej jest źródło i punkt obserwacji (stanowisko pracy) s w stosunku do wysokości pomieszczenia H (tj. s/H).

Jak poprzednio, skuteczność tak zastosowanego ekranu akustycznego określa się wtrąceniową różnicą poziomów ciśnienia akustycznego $D_{p,i}$ w odniesieniu do częstotliwości f z zakresu 500 – 4000 Hz oraz wtrąceniową różnicą poziomów dźwięku A , D_{pA} . Wyznaczone empirycznie (przykładowo wg [1]) wartości wtrąceniowej różnicy poziomów ciśnienia akustycznego $D_{p,i}$ w pomieszczeniach biurowych podano w tab. 2.

Wysokość ekranu akustycznego h musi zapewniać nad nim minimum 0,2 m prześwitu (ze względu na ogrzewanie, wentylację i klimatyzację).

Inne, nieakustyczne, wymagania stawiane ekranom akustycznym określone są w normie [1].

Tabela 2. Wtrąceniowa różnica poziomów ciśnienia akustycznego D_{pf} w paśmie częstotliwości 500-4000 Hz wg [1]
 Table 2. Loss difference in sound pressure level D_{pf} in the frequency band 500-4000 Hz according to [1]

h/H	s/H		
	< 0,3	0,3-1	1-3
< 0,3	7 dB	4 dB	-
0,3-0,5	10 dB	7 dB	4 dB
> 0,5	-	9 dB	6 dB

gdzie:

h – wysokość ekranu, w metrach

H – wysokość pomieszczenia, w metrach

s – odległość źródło – punkt obserwacji, w metrach.

Określenie skuteczności zastosowania ekranu akustycznego do obniżenia hałasu na stanowiskach pracy przy pomocy programu komputerowego – przykład

Poniżej przedstawiono wyniki obliczeń wpływu ekranów akustycznych na poziom dźwięku A w pomieszczeniu. W pomieszczeniu rozpatrywano jedno źródło, dwa stanowiska pracy oraz jeden ekran akustyczny. Uwzględniono cztery różne położenia ekranu akustycznego. Obliczenia wykonano przy zastosowaniu programu Odeon. Wymiary pomieszczenia to: 18 m x 10 m x 4 m. Współczynniki pochłaniania dźwięku α : podłogi i ścian 0,2; stropu 0,9; ekranów akustycznych 0,2 (poza ekranem przy źródle, tj. w odległości 0,1 m, dla niego przyjęto 0,9). Ekran przy stanowiskach miały wymiary 4 m x 1,5 m, natomiast ekran rozdzielający pomieszczenie 8,6 m x 3,8 m. Źródło akustyczne oraz punkty obserwacji (punkty obliczeń) zlokalizowano na dłuższej osi symetrii pomieszczenia, na wysokości 1,2 m. Źródło umieszczono w odległości 2 m od ściany, a punkty obserwacyjne w odległości 2 – (stanowisko 1) i 4 m (stanowisko 2) od niego (i, dodatkowo, stanowiska 3 i 4 w odległości 1 m od ekranu rozdzielającego pomieszczenie).

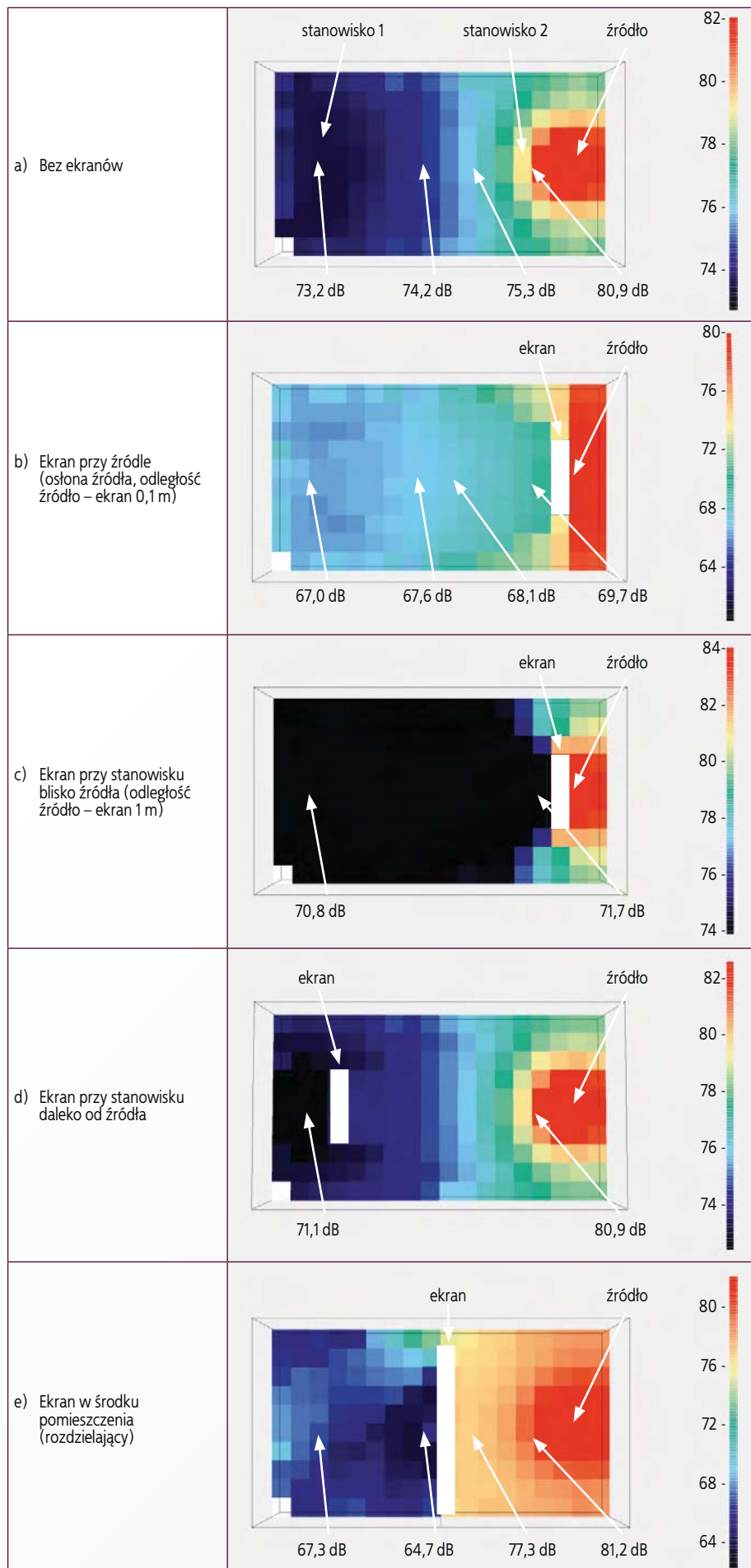
Ekran przy stanowiskach (1 i 2) ustawiono w odległości 1 m od stanowisk (od strony źródła). Ekran rozdzielający umieszczono w środku pomieszczenia, prostopadle do dłuższej osi symetrii pomieszczenia, tak, że stykał się jedną boczną krawędzią ze ścianą. Wyniki obliczeń podano na rysunku.

Wnioski z obliczeń:

- ekran (o wymiarach 4 m x 1,5 m) bezpośrednio (0,1 m) zlokalizowany przy źródle (osłona źródła) o współczynniku pochłaniania dźwięku 0,9 (rys. 1a i 1b):

- wpływa na zmniejszenie hałasu w całym pomieszczeniu za ekranem; w największym stopniu wpływa na zmniejszenie poziomu dźwięku A bezpośrednio za ekranem (tj. na stanowisku 1 zmniejszenie poziomu dźwięku A wynosi 11,2 dB, w średnim stopniu wpływa na zmniejszenie poziomu dźwięku A w dużej odległości za ekranem (tj. na stanowisku 2) o 6,2 dB

- wpływa także nieznacznie na podniesienie hałasu po tej stronie ekranu, co źródło



Rys. Rozkłady poziomu dźwięku A w pomieszczeniu, dla różnych ekranów akustycznych i ich usytuowania
 Fig. A-weighted sound pressure level distributions in a room for various acoustic screens and their location

- ekran (o wymiarach 4 m x 1,5 m) zlokalizowany w sąsiedztwie stanowiska 1 (znajdujący się blisko źródła hałasu, tj. ekran i stanowisko 1 w obszarze w odległości od źródła mniejszej niż promień graniczny pomieszczenia; rys. a i c):

- wpływa na zmniejszenie hałasu w całym pomieszczeniu za ekranem, w największym stopniu bezpośrednio za ekranem (tj. na stanowisku 1) zmniejszenie poziomu dźwięku A o 9,2 dB, w małym stopniu w dużej odległości za ekranem (tj. na stanowisku 2) o 2,4 dB

- ekran (o wymiarach 4 m x 1,5 m) zlokalizowany w sąsiedztwie stanowiska 2 (daleko od źródła hałasu, tj. ekran i stanowisko 2 w obszarze w odległości od źródła większej od promienia granicznego pomieszczenia; rys. a i d):

- wpływa na zmniejszenie hałasu tylko za ekranem (tj. w obszarze obejmującym m.in. stanowisko 2) o 2,1 dB

- ekran (o wymiarach 8,6 m x 3,8 m) rozdzielający pomieszczenie (o takim samym współczynniku pochłaniania dźwięku α jak ściany i podłoga pomieszczenia (rys. a i e):

- obniża hałas w części pomieszczenia bez źródła o ok. 5,9-9,5 dB (na stanowisku pracy 2 o 5,9 dB; bezpośrednio za ekranem o 9,5 dB). Skuteczności akustycznej tego rozdzielania nie można zwiększyć przez uszczelnienie prześwitów z boku i nad ekranem, ponieważ zgodnie z przepisami [1], od góry ekranu musi być prześwit minimum 0,2 m (wentylacja itp.), a z jednej strony ekran musi być w odległości minimum 1,4 m od ściany pomieszczenia (droga ewakuacyjna).

- podwyższa hałas w części pomieszczenia ze źródłem o ok. 0,3 – 2 dB (na stanowisku pracy 1 przy źródle, tj. w obszarze w odległości od źródła mniejszej niż promień graniczny pomieszczenia – 0,3 dB; przy ekranie rozdzielającym pomieszczenie, tj. w odległości od źródła większej od promienia granicznego pomieszczenia – 2,0 dB).

Reasumując, można stwierdzić, że wyniki obliczeń potwierdzają wcześniejsze wnioski. Ekran akustyczny w pomieszczeniu może spowodować zmniejszenie hałasu w pewnym jego obszarze. Zastosowanie ekranu powoduje zmniejszenie hałasu za ekranem (tj. po drugiej stronie ekranu niż źródło), a jednocześnie niewielkie zwiększenie hałasu między ekranem i źródłem. Maksymalne zmniejszenie hałasu w rozpatrywanych przykładach obliczeniowych wynosiło ok. 11 dB (dla ekranu akustycznego bezpośrednio przy źródle i stanowiska pracy za ekranem), a jego minimalne zmniejszenie – 2,1 dB (dla ekranu zlokalizowanego w dużej odległości od źródła i stanowiska pracy za ekranem). Zwiększenie hałasu wywołane ekranem po tej samej stronie ekranu co źródło zawierało się w zakresie 0,3-2 dB.

Zalecenia dotyczące stosowania ekranów akustycznych w pomieszczeniach

Najbardziej skutecznym sposobem zastosowania ekranu akustycznego jest jego instalacja w sąsiedztwie źródła hałasu (osłona źródła). W celu ograniczenia zwiększenia hałasu po tej samej stronie ekranu co źródło musi być on pokryty materiałem dźwiękochłonnym najlepiej klasy

pochłaniania dźwięku A. Wówczas zwiększenie hałasu (zwiększenie poziomu dźwięku A) można traktować jako pomijalnie małe. Po drugiej stronie ekranu, tj. w przeważającej części pomieszczenia hałas znacznie się zmniejsza (najbardziej tuż za ekranem): w rozpatrywanym w artykule przypadku obniżył się o 6 – 11 dB. Jeżeli ekranu nie można zastosować bezpośrednio przy źródle, to należy usytuować go w większej odległości. W przypadku, gdy ekran i stanowisko pracy będą w odległości od źródła mniejszej od promienia granicznego pomieszczenia, skuteczność ekranu będzie zależała od stosunku tych odległości i nadal będzie duża (im mniejsza wartość tego stosunku, tym będzie większa). W rozpatrywanym przypadku zawierała się w zakresie 2 – 9 dB.

W przypadku, gdy ekran i stanowisko pracy będą w odległości od źródła większej od promienia granicznego pomieszczenia, wtedy skuteczność ekranu będzie mała (w rozpatrywanym przypadku ok. 1 – 2 dB). Ponieważ ekran wpływa na zmniejszenie hałasu po stronie, gdzie nie ma źródła, korzystnie jest umieszczać go jak najbliżej źródła (nawet, gdy stanowiska są dalej), gdyż obszar w pomieszczeniu, w którym hałas się zmniejsza, będzie wówczas największy. Rozdzielenie ekranem akustycznym pomieszczenia jest drugim, po zastosowaniu ekranu bezpośrednio przy źródle, sposobem pod względem skuteczności zmniejszenia hałasu. Skuteczność tego rozwiązania w rozpatrywanym wyżej przypadku to 6 – 10 dB. Niestety ze względu na wymiary ekranu jest to najbardziej skomplikowane i najdroższe rozwiązanie z rozpatrywanych.

Podsumowanie

Stosowanie ekranów akustycznych w pomieszczeniach może być dobrym i efektywnym akustycznie środkiem technicznym zmniejszenia hałasu, pod warunkiem spełnienia pewnych zasad związanych z jego skutecznością rozważanych w tym artykule w świetle obowiązującej normy i popartych przykładem [1]. Najbardziej efektywne jest zastosowanie ekranów akustycznych jako częściowych osłon źródła hałasu, szczególnie od strony maksymalnej emisji energii akustycznej (źródła o kierunkowej charakterystyce emisji hałasu). Można się tutaj spodziewać zmniejszenia poziomu dźwięku A maksymalnie do ok. 15 dB (rys. a oraz b i c). W takich przypadkach duży wpływ na efektywność ekranu ma zastosowanie na jego powierzchni od strony źródła materiału dźwiękochłonnego o dużym współczynniku pochłaniania dźwięku α .

Niewiele mniej efektywnym sposobem zmniejszenia hałasu w części pomieszczenia (w tym na stanowiskach pracy w tej części) jest rozdzielanie go ekranem akustycznym. Wielkość takiego ekranu powinna być jak największa. Powyżej ekranu akustycznego konieczne jest zostawienie prześwitu (minimum 0,2 m w celu zapewnienia wentylacji w pomieszczeniu). Między jednym bokiem ekranu a ścianą konieczne jest zostawienie prześwitu o szerokości min. 1,4 m (będzie stanowić drogę ewakuacyjną). To rozwiązanie może obniżyć

poziom dźwięku A o ok. 5 – 10 dB w odgródzonej ekranem części pomieszczenia bez źródła (rys. e). W przypadku stanowisk pracy znajdujących się blisko źródeł (w odległości mniejszej lub równej promieniowi granicznemu pomieszczenia), zastosowanie ekranu akustycznego jest także efektywne (może być nawet porównywalne z zastosowaniem ekranu w przestrzeni otwartej, gdy różnica poziomów dźwięku A fali bezpośredniej i fal odbitych jest większa niż 10-15 dB).

W przypadkach, gdy konieczne jest zmniejszenie hałasu na stanowiskach pracy o ok. 1 – 2 dB, to można zastosować ekran akustyczny przy znajdującym się stanowisku zlokalizowanym w większej odległości od źródła (tj. w odległości większej niż promień graniczny pomieszczenia). Trzeba pamiętać, że ekrany akustyczne powinny być jak najwyższe, a ich minimalna względna wysokość to 0,3 m powyżej osi źródła – głowa pracownika. Ekran akustyczny, zlokalizowany jak najbliżej źródła hałasu, powinien być jak największy oraz pokryty materiałem dźwiękochłonnym o jak największym współczynniku pochłaniania dźwięku.

Reasumując przedstawione w artykule analizy i wyniki obliczeń można stwierdzić, że ekrany akustyczne są rozwiązaniem skutecznym w zmniejszeniu hałasu oddziałującego na pracowników na stanowiskach pracy. Sformułowane zalecenia dotyczące skuteczności ekranów i ich zastosowań mogą być użyteczne przy praktycznym stosowaniu ekranów akustycznych w pomieszczeniach.

BIBLIOGRAFIA

- [1] PN-EN ISO 17624:2008 Akustyka – Wytyczne dotyczące ograniczenia hałasu w biurach i pomieszczeniach pracy za pomocą ekranów akustycznych
- [2] Mikulski W., Warmiak I. *Adaptacja akustyczna pomieszczeń biurowych z zastosowaniem dźwiękochłonných sufitów podwieszanych*. „Bezpieczeństwo Pracy. Nauka i Praktyka” 2017,545,2:20-24
- [3] PN-B-02151-4:2015-06 Akustyka budowlana – Ochrona przed hałasem w budynkach – Część 4: Wymagania dotyczące warunków pogłosowych i zrozumiałości mowy w pomieszczeniach oraz wytyczne prowadzenia badań
- [4] Mikulski W. *Warunki akustyczne w pomieszczeniach biurowych open space – Wyniki badań pilotażowych*. „Medycyna Pracy” 2016,67,5:653-662 (<http://dx.doi.org/10.13075/mp.5893.00425>)
- [5] Mikulski W., Warmiak I. *Obiektywne kryteria oceny właściwości akustycznych otwartych pomieszczeń biurowych*. „Bezpieczeństwo Pracy. Nauka i Praktyka” 2015,530,11:18-21
- [6] PN-EN ISO 11654:1999 Akustyka – Wyroby dźwiękochłonne używane w budownictwie – Wskaźnik pochłaniania dźwięku
- [7] Mikulski W. i in. *Bezpieczeństwo i ochrona człowieka w środowisku pracy. Moduł 8 – Hałas*. CIOP-PiB, Warszawa 2015

Publikacja opracowana na podstawie wyników III etapu programu wieloletniego pn. „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy”, sfinansowanego w latach 2014-2016 w zakresie badań naukowych i prac rozwojowych ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego/Narodowego Centrum Badań i Rozwoju. Koordynator programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy.