

dr inż. WITOLD MIKULSKI

Centralny Instytut Ochrony Pracy
– Państwowy Instytut Badawczy

Kontakt: wimik@ciop.pl

DOI: 10.5604/01377043.1231501

Adaptacja akustyczna pomieszczeń biurowych z zastosowaniem dźwiękochłonnych sufitów podwieszanych

Fot. nastazia/Bigstockphoto



Praca w pomieszczeniach biurowych wymaga zapewnienia jak najmniejszego hałasu. Temu celowi służy czas pogłosu pomieszczenia równy 0,4-0,6 s. Aby uzyskać taki standard warunków akustycznych, pomieszczenia muszą mieć dużą chłonność akustyczną. Minimalna chłonność akustyczna pomieszczeń biurowych open space przypadająca na metr kwadratowy podłogi wynosi 1,1 m². W artykule podano metodę obliczania chłonności akustycznej pomieszczeń wg polskiej normy PN-B-02151-4:2015. Podano przykład zastosowania w pomieszczeniu dwóch dźwiękochłonnych sufitów podwieszanych o różnych współczynnikach pochłaniania dźwięku α . Wyniki obliczeń chłonności akustycznej wykazały, że dopiero sufit dźwiękochłonny o współczynniku pochłaniania dźwięku 0,9 będzie wystarczający do uzyskania odpowiedniej chłonności akustycznej. Podana metoda powinna być wykorzystywana zawsze przy projektowaniu i modernizacji pomieszczeń biurowych.

Słowa kluczowe: akustyka pomieszczeń, dźwiękochłonne sufity podwieszane, pomieszczenia biurowe open space

The acoustic treatment of an office room with the use of sound absorbing suspended ceilings

Working in an office room required to ensure the lowest possible noise. For this purpose, a room should provide a reverberation time RT between 0,4 and 0,6 s. In order to achieve such a standard in regard to acoustic conditions, rooms must have high sound absorption. Minimum sound absorption of open plan office rooms per square meter of floor is 1.1 m². The article presents a method for calculating sound absorption of room according to Polish standards PN-B-02151-4:2015. An example of use of the two acoustic ceilings with different sound absorption coefficients α has been given. The results of calculation of sound absorption of the room showed that a ceiling with sound absorption α above 0.9 will be sufficient to obtain appropriate acoustic absorption. The given method should always be used when designing and renewal of office rooms.

Keywords: room acoustics, sound absorbing ceiling, open plan office

Wstęp

Głównym skutkiem wpływu hałasu na pracowników w pomieszczeniach biurowych jest jego uciążliwość i problemy z koncentracją, prowadzące do spadku wydajności i jakości pracy. Dlatego też w pomieszczeniach biurowych konieczne jest ograniczenie hałasu na poziomie znacznie niższym, niż wynika to z wartości dopuszczalnych określonych ze względu na ochronę słuchu (NDN hałasu). Wypadkowy hałas w pomieszczeniu zależy od źródeł hałasu oraz od właściwości akustycznych pomieszczenia. Te ostatnie decydują o tym, jak dużo w pomieszczeniu jest tzw. hałasu pogłosowego, czyli jak dużo jest dźwięków odbitych od ścian podłogi i stropu pomieszczenia. Znaczy to, że im pomieszczenie mniej odbija dźwięki (bardziej pochłania dźwięki), tym mniej jest dźwięków odbitych, a tym samym mniej hałasu w pomieszczeniu.

Pochłanianie dźwięków przez pomieszczenie określa się wielkością fizyczną „chłonność akustyczna pomieszczenia”. Im większa chłonność akustyczna pomieszczenia, tym mniej hałasu pogłosowego, a tym samym hałasu wypadkowego. Dlatego w pomieszczeniach biurowych odpowiednie warunki akustyczne określa się, podając wymaganą minimalną chłonność akustyczną pomieszczenia. Ponieważ zależy ona od kubatury (objętości) pomieszczenia, dlatego aby w wymaganiach uniezależnić się od wielkości pomieszczenia, wymaganą minimalną chłonność akustyczną pomieszczenia określa się ilorazem pewnej liczby stałej wynikającej z przeznaczenia pomieszczenia (np. „1,1” – dla pomieszczeń biurowych open space) i pola powierzchni rzutu pomieszczenia [1]).

W artykule podano metodykę uzyskania wymaganej chłonności akustycznej pomieszczenia poprzez zastosowanie adaptacji akustycznej pomieszczenia w postaci dźwiękochłonnego sufitu podwieszanego. Uwzględniono obliczenie chłonności akustycznej pomieszczenia metodą obliczeniową podaną w PN-B-02151-4:2015 [1]. W artykule podano także przykład projektu adaptacji akustycznej pomieszczenia biurowego, polegającej na uwzględnieniu w nim dźwiękochłonnego sufitu podwieszanego, co umożliwiło uzyskanie wymaganej chłonności akustycznej pomieszczenia.

Wzór nr 1

$$A = A_{\text{powierzchni}} + A_{\text{wyposazenie}} + A_{\text{air}} = \sum_{i=1}^n \alpha_i S_i + \sum_{j=1}^o A_{\text{obj},j} + 4mV$$

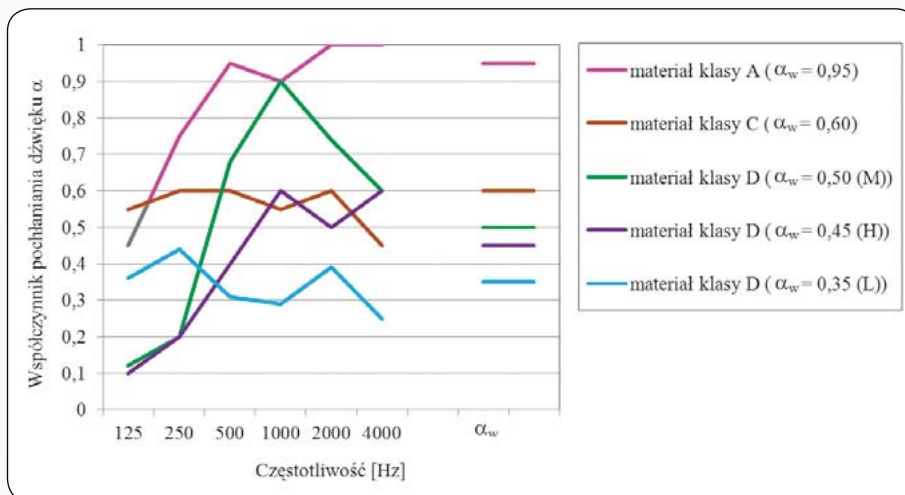
gdzie:

- A – chłonność akustyczna pomieszczenia, w m²;
- A_{powierzchni} – chłonność akustyczna powierzchni ograniczających pomieszczenie, w m²;
- A_{wyposazenie} – chłonność akustyczna elementów wyposażenia, w m²;
- A_{air} – chłonność akustyczna wynikająca z pochłaniania dźwięku w powietrzu, w m²;
- n – liczba powierzchni ograniczających pomieszczenie;
- o – liczba elementów wyposażenia, dla których określono chłonność akustyczną;
- α_i – współczynnik pochłaniania dźwięku i-tej powierzchni ograniczającej pomieszczenie (scharakteryzowane jednakowym co do wartości współczynnikiem pochłaniania dźwięku);
- S_i – pole powierzchni i-tej powierzchni ograniczającej pomieszczenie, m²;
- A_{obj,j} – chłonność akustyczna j-tego elementu wyposażenia, w m²;
- m – mocowy współczynnik pochłaniania dźwięku w powietrzu, w neperach na metr (tabela 1.);
- V – kubatura pomieszczenia, w m³.

Tabela 1. Mocowy współczynnik pochłaniania dźwięku m, wg [1]

Table 1. Sound absorption coefficient in air "m" (in the Np/m) [1]

Temperatura/wilgotność względna powietrza	Mocowy współczynnik pochłaniania dźwięku m, w powietrzu dla częstotliwości, f [Np/m]		
	500 Hz	1 000 Hz	2 000 Hz
20 °C/30 – 50%	0,0006	0,001	0,0019
20 °C/50 – 70%	0,0006	0,001	0,0017



Rys. Współczynnik pochłaniania dźwięku wybranych materiałów dźwiękochłonnych
Fig. Sound absorption coefficient α of selected sound absorption materials

Tabela 2. Klasy pochłaniania dźwięku materiałów wg PN-EN ISO 11654 [2]

Table 2. Classes of sound absorption materials according to EN ISO 11654 [2]

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

Chłonność akustyczna pomieszczenia

Chłonność akustyczna pomieszczenia to miara jego całkowitej zdolności do pochłaniania i tłumienia dźwięków. Składa się na nią: chłonność akustyczna wszystkich powierzchni wewnętrznych (ograni-

czających pomieszczenie), chłonność akustyczna znajdującego się w nim wyposażenia oraz chłonność akustyczna wynikająca z pochłaniania dźwięku przez powietrze. Chłonność akustyczną pomieszczenia określa się (w m²) na podstawie wzoru nr 1 [1].

Współczynnik pochłaniania dźwięku powierzchni α to wielkość fizyczna, za pomocą której określa się właściwości dźwiękochłonne materiałów i wyrobów (np. użytych w dźwiękochłonnych sufitach podwieszanych). Przyjmuje on wartość od 0 do 1, gdzie 1 oznacza, że energia dźwiękowa padająca na materiał została w całości przez niego pochłonięta, natomiast wartość 0 oznacza, że powierzchnia w całości odbija padającą energię dźwiękową.

Ponieważ współczynnik pochłaniania dźwięku powierzchni materiałów (a więc także chłonność akustyczna pomieszczenia) zależy od częstotliwości dźwięku, w artykule zgodnie z normą określa się go dla częstotliwości: 500, 1000 i 2000 Hz [1].

Współczynnik pochłaniania dźwięku powierzchni materiałów dźwiękochłonnych stosowanych w adaptacjach akustycznych

Producenci materiałów dźwiękochłonnych określają właściwości dźwiękochłonne własnych wyrobów w zakresie częstotliwości ok. 100 – 4000 Hz, często jednak charakteryzują materiał jedynie za pomocą jednolitego tzw. ważonego współczynnika pochłaniania dźwięku materiału α_w. Metoda określania ważonego współczynnika pochłaniania dźwięku materiału podana w PN-EN ISO 11654:1999 polega na znalezieniu ze wszystkich materiałów wzorcowych takiego, którego charakterystyka współczynnika pochłaniania dźwięku jest najbardziej zbliżona do charakterystyki określanego materiału [2].

Wartość ważonego współczynnika pochłaniania dźwięku określanego materiału α_w jest równa wartości tej wielkości materiału wzorcowego. Wartości ważonego współczynnika pochłaniania dźwięku materiału zawierają się w przedziale od 0 do 1 i są wielokrotnościami liczby 0,05 (tj. 0; 0,05; 0,1; 0,15; 0,2; 0,25; 0,3 itd.). W przypadku, gdy materiały charakteryzują się szczególnie dużymi własnościami dźwiękochłonnymi w zakresie niskich częstotliwości (250 Hz), razem z wartością ważonego współczynnika pochłaniania dźwięku α_w podaje się oznaczenie „(L)”, (rys.). Analogicznie, gdy materiał charakteryzuje się szczególnie dużymi własnościami dźwiękochłonnymi w zakresie częstotliwości średnich (500 – 1000 Hz) lub wysokich (2000 – 4000 Hz), razem z wartością ważonego współczynnika pochłaniania dźwięku α_w podaje się oznaczenie odpowiednio „(M)” lub „(H)”, (rys.).

W celu dalszego uproszczenia klasyfikacji materiałów pod względem ich właściwości dźwiękochłonnych, dzieli się je (wg [2]) na 6 klas podanych w tabeli 2.

Materiałem, który najbardziej pochłania dźwięk, jest ten, który charakteryzuje się największym ważonym współczynnikiem pochłaniania dźwięku α_w, tj. równym lub większym od 0,90. Oznaczony jest on klasą pochłaniania dźwięku materiału dźwiękochłonnego „A”.

Na wartość współczynnika pochłaniania dźwięku materiałów w zakresie niskich częstotliwości (125, 250 i 500 Hz) ma wpływ odległość materiału od powierzchni ściany (w przypadku dźwiękochłonnych sufitów podwieszanych odległość od stropu). Dlatego niektórzy producenci podają obok wartości współczynników pochłaniania dźwięku materiału odległość, przy której wartości te były określone.

Zgodnie z wynikami badań, które przeprowadzone zostały w CIOP-PIB, najlepsza odległość dźwiękochłonnego sufitu podwieszanego od stropu pomieszczeń biurowych pod względem uzyskania odpowiednich warunków akustycznych (tj. uzyskania większej niż wymagana minimalna chłonność akustyczna pomieszczenia) to ok. 0,65 m [3, 4]. Jednak ze względów technicznych w większości przypadków tak dużej odległości nie można z przyczyn technicznych zastosować. Należy wówczas dążyć do tego, aby odległość ta była jak największa. Za minimalną odległość podwieszenia dźwiękochłonnego sufitu należy przyjąć 0,16 m.

Zalecane właściwości akustyczne pomieszczeń określone wymaganymi minimalnymi wartościami chłonności akustycznej pomieszczenia

W czerwcu 2015 r. wprowadzono PN-B-02151-4 [1], która określa wymagania dotyczące warunków pogłosowych i zrozumiałości mowy w pomieszczeniach. Znalazły się w niej wymagane minimalne wartości chłonności akustycznej pomieszczeń A_{min} (w tym pomieszczeń biurowych; tabela 3.), [1].

Metodyka postępowania przy doborze materiałów dźwiękochłonnych w dźwiękochłonnym suficie podwieszanym

Celem adaptacji akustycznej pomieszczenia jest uzyskanie większej lub równej od wymaganej minimalnej A_{min} chłonności akustycznej (warunek 1.).

Warunek 1.

$$A_i \geq A_{i, min}$$

gdzie:

A_i – chłonność akustyczna pomieszczenia dla częstotliwości 500, 1000, 2000 Hz, w m^2 ;
 $A_{i, min}$ – wymagana minimalna chłonność akustyczna pomieszczenia dla częstotliwości jak A_i , w m^2 .

Chłonność akustyczną pomieszczenia wg [1] należy zapewnić oddzielnie dla wszystkich częstotliwości: 500, 1000 i 2000 Hz.

Jeżeli warunek ten nie jest spełniony (nawet dla jednej z wymienionych częstotliwości), wówczas należy zwiększać chłonność akustyczną pomieszczenia aż do osiągnięcia wymaganej. Wykonuje się to przez pokrycie powierzchni ograniczających pomieszczenie materiałami dźwiękochłonnymi i/lub wprowadzenie do pomieszczenia elementów o dużej chłonności akustycznej (wzór nr 1).

W praktyce ze względów technicznych oraz efektywności działań, w pierwszej kolejności materiał dźwiękochłonny umieszcza się w suficie podwieszanym lub przyklejając go do stropu. W przypadku nieuzyskania wymaganych właściwości akustycznych pomieszczenia za pomocą tego rozwiązania materiałami dźwiękochłonnymi pokrywa się także ściany.

Wpływ dźwiękochłonnego sufitu podwieszanego na chłonność akustyczną jest tym większy, im większe jest pole powierzchni sufitu oraz im większy współczynnik pochłaniania dźwięku materiału zastosowanego w suficie.

Metodykę postępowania przy projektowaniu adaptacji akustycznej pomieszczenia biurowego, która pozwoli uzyskać wymaganą chłonność akustyczną pomieszczenia, przedstawiono w trzech krokach. Metodyka ta oparta jest na metodzie obliczeniowej podanej w PN-B-02151-4 [1].

Krok pierwszy – określenie chłonności akustycznej pomieszczenia bez adaptacji akustycznej

Należy określić:

- wymiary pomieszczenia (w tym kubaturę i pole powierzchni rzutu pomieszczenia, tj. w większości przypadków podłogi)
- pole powierzchni ograniczających pomieszczenie (m.in. ścian, stropu, podłogi, okien, drzwi itp.)

Tabela 3. Wymagana minimalna chłonność akustyczna wybranych pomieszczeń, A_{min} jako iloraz pola powierzchni rzutu wybranych pomieszczeń S (w praktyce pola powierzchni podłogi; w m^2) oraz liczby zależnej od przeznaczenia pomieszczenia (wg PN-B-02151-4 [1])

Table 3. The required minimum sound absorption of selected rooms, A_{min} , as the ratio of the floor area in rooms S and the number depends on the purpose of the room (PN-B-02151-4 [1])

Lp.	Rodzaj pomieszczenia	Wymagana minimalna chłonność akustyczna A_{min} pomieszczenia, m^2
1.	Biura wielkoprzestrzenne, otwarte pomieszczenia do prac administracyjnych tzw. „open space”, sale operacyjne banków i urzędów, biura obsługi klienta oraz inne pomieszczenia o podobnym przeznaczeniu	1,1 x S
2.	Centra obsługi telefonicznej	1,3 x S
3.	Kuchnie i pomieszczenia zaplecza gastronomicznego (z wyjątkiem magazynów)	0,4 x S

Dotyczy pomieszczeń wykończonych, umeblowanych i wyposażonych w sposób typowy dla przeznaczenia, bez obecności ludzi.

Tabela 4. Wyniki obliczeń chłonności akustycznej powierzchni ograniczających pomieszczenie $A_{powierzchni}$ przed adaptacją akustyczną (wartości współczynników pochłaniania dźwięku α wg normy [1] oraz bazy danych w programie ODEON)

Table 4. The results of calculation of sound absorption of all surface limiting the room $A_{powierzchni}$ before acoustic treatment (sound absorption coefficients according to the standard [1] or the ODEON database)

Elementy pomieszczenia	Pole powierzchni $[m^2]$	Współczynnik pochłaniania dźwięku α powierzchni ograniczających pomieszczenie			Chłonność akustyczna powierzchni ograniczających pomieszczenie $[m^2]$		
		500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz
Strop (bez opraw oświetleniowych) – beton szorstki	78,24	0,03	0,03	0,04	2,35	2,35	3,13
Podłoga – dywan z przędzy włosowej na piance poliuretanowej	84,24	0,35	0,65	0,62	29,48	54,76	52,23
3 ściany (dwie duże, jedna mała, na ścianach dużych okna i drzwi) – tynk cementowo-wapienny na murze, malowany	79,64	0,02	0,02	0,02	1,59	1,59	1,59
1 ściana (mała) – płyta gipsowo-kartonowa o grubości 12,5 mm na stelażu stalowym z pustką 100 mm wypełnioną wełną mineralną	24,48	0,08	0,06	0,06	1,96	1,47	1,47
Okna – szkło okienne, typowe	22,4	0,4	0,25	0,34	8,96	5,60	7,62
Oprawy oświetleniowe	6	0,2	0,1	0,1	1,20	0,60	0,60
Drzwi – lekkie drzwi z pustką lub wypełnieniem piankowym	2	0,15	0,1	0,1	0,30	0,20	0,20
Chłonność akustyczna powierzchni ograniczających pomieszczenie $A_{powierzchni} [m^2]$					45,84	66,56	66,84

Tabela 5. Wyniki obliczeń chłonności akustycznej wyposażenia przykładowego pomieszczenia $A_{wyposazenie}$ (wartości współczynników pochłaniania dźwięku α wg normy [1])

Table 5. The results of calculation of sound absorption of sample room equipment $A_{wyposazenie}$ (sound absorption coefficients α according to the standard [1])

Elementy wyposażenia	Liczba elementów	Chłonność akustyczna jednego elementu wyposażenia $[m^2]$			Chłonność akustyczna elementów wyposażenia $[m^2]$		
		500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz
Mebłe biurowe – typowe stanowisko	10 szt.	0,45	0,45	0,6	4,50	4,50	6,00
Krzesełko tapicerowane	10 szt.	0,3	0,35	0,4	3,00	3,50	4,00
Chłonność akustyczna wyposażenia pomieszczenia $A_{wyposazenie} [m^2]$					7,50	8,00	10,00

Tabela 6. Wyniki obliczeń chłonności akustycznej wynikającej z pochłaniania dźwięku przez powietrze w przykładowym pomieszczeniu A_{air} (dla temperatury 20 °C i wilgotności względnej powietrza od 30% do 50%)

Table 6. The calculation results of sound absorption by the air in the sample room A_{air} (at 20 °C and a relative humidity between 30% and 50%)

Kubatura pomieszczenia $V [m^3]$	Mocowy współczynnik pochłaniania dźwięku m , w powietrzu $[Np/m]$			Chłonność akustyczna wynikająca z pochłaniania dźwięku przez powietrze $[m^2]$		
	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz
286,416	0,0006	0,001	0,0019	0,69	1,15	2,18
Chłonność akustyczna wynikająca z pochłaniania dźwięku przez powietrze $A_{air} [m^2]$				0,69	1,15	2,18

Tabela 7. Chłonność akustyczna przykładowego pomieszczenia przed adaptacją akustyczną

Table 7. Sound absorption of the sample room before the acoustic treatment

Elementy pomieszczenia	Chłonność akustyczna $[m^2]$		
	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz
Chłonność akustyczna powierzchni ograniczających pomieszczenie $A_{powierzchni}$	45,84	66,56	66,84
Chłonność akustyczna wyposażenia $A_{wyposazenie}$	7,50	8,00	10,00
Chłonność akustyczna wynikająca z pochłaniania dźwięku przez powietrze A_{air}	0,69	1,15	2,18
Chłonność akustyczna pomieszczenia	54,03	75,71	79,02
Wymagana minimalna chłonność akustyczna pomieszczenia*	92,66	92,66	92,66

*wartości z tabeli 3 po pomnożeniu krotności przez pole powierzchni rzutu pomieszczenia

Tabela 8a. Wyniki obliczeń chłonności akustycznej powierzchni ograniczających przykładowe pomieszczenie $A_{\text{powierzchni}}$ z uwzględnieniem dźwiękochłonnego sufitu podwieszanego klasy pochłaniania dźwięku C

Table 8a. The results of calculation of sound absorption of all surface limiting the sample room $A_{\text{powierzchni}}$ taking into account the sound absorbing ceiling class C

Elementy pomieszczenia	Pole powierzchni [m ²]	Współczynnik pochłaniania dźwięku α ograniczających pomieszczenie			Chłonność akustyczna powierzchni ograniczających pomieszczenie [m ²]		
		500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz
Strop – beton szorstki (część wokół dźwiękochłonnego sufitu podwieszanego i bez opraw oświetleniowych)	17,90	0,03	0,03	0,04	0,54	0,54	0,72
Dźwiękochłonny sufit podwieszany klasy pochłaniania dźwięku C	60,34	0,60	0,55	0,60	36,20	33,19	36,20
Podłoga – dywan z przędzy włosowej na piance poliuretanowej	84,24	0,35	0,65	0,62	29,48	54,76	52,23
3 ściany (dwie duże, jedna mała, na ścianach dużych okna i drzwi) – tynk cementowo-wapienny na murze, malowany	79,64	0,02	0,02	0,02	1,59	1,59	1,59
1 ściana (mała) – płyta gipsowo-kartonowa o grubości 12,5 mm na stelażu stalowym z pustką 100 mm wypełnioną wełną mineralną	24,48	0,08	0,06	0,06	1,96	1,47	1,47
Okna – szkło okienne, typowe	22,4	0,4	0,25	0,34	8,96	5,60	7,62
Oprawy oświetleniowe	6	0,2	0,1	0,1	1,20	0,60	0,60
Drzwi – lekkie drzwi z pustką lub wypełnieniem piankowym	2	0,15	0,1	0,1	0,30	0,20	0,20
Chłonność akustyczna powierzchni ograniczających pomieszczenie $A_{\text{powierzchni}}$					80,24	97,94	100,63

Tabela 8b. Wyniki obliczeń chłonności akustycznej powierzchni ograniczających przykładowe pomieszczenie $A_{\text{powierzchni}}$ z uwzględnieniem dźwiękochłonnego sufitu podwieszanego klasy pochłaniania dźwięku A

Table 8b. The results of calculation of sound absorption of all surface limiting the sample room $A_{\text{powierzchni}}$ taking into account the sound absorbing ceiling class A

Elementy pomieszczenia	Pole powierzchni [m ²]	Współczynnik pochłaniania dźwięku α powierzchni			Chłonność akustyczna powierzchni pomieszczenia [m ²]		
		500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz
Strop – beton szorstki (część wokół dźwiękochłonnego sufitu podwieszanego i bez opraw oświetleniowych)	17,90	0,03	0,03	0,04	0,54	0,54	0,72
Dźwiękochłonny sufit podwieszany klasy pochłaniania dźwięku A	60,34	0,95	0,90	1,00	57,32	54,31	60,34
Podłoga – dywan z przędzy włosowej na piance poliuretanowej	84,24	0,35	0,65	0,62	29,48	54,76	52,23
3 ściany (dwie duże, jedna mała, na ścianach dużych okna i drzwi) – tynk cementowo-wapienny na murze, malowany	79,64	0,02	0,02	0,02	1,59	1,59	1,59
1 ściana (mała) – płyta gipsowo-kartonowa o grubości 12,5 mm na stelażu stalowym z pustką 100 mm wypełnioną wełną mineralną	24,48	0,08	0,06	0,06	1,96	1,47	1,47
Okna – szkło okienne, typowe	22,4	0,4	0,25	0,34	8,96	5,60	7,62
Oprawy oświetleniowe	6	0,2	0,1	0,1	1,20	0,60	0,60
Drzwi – lekkie drzwi z pustką lub wypełnieniem piankowym	2	0,15	0,1	0,1	0,30	0,20	0,20
Chłonność akustyczna powierzchni ograniczających pomieszczenie $A_{\text{powierzchni}}$					101,36	119,06	124,76

Tabela 9a. Chłonność akustyczna przykładowego pomieszczenia z uwzględnieniem dźwiękochłonnego sufitu podwieszanego klasy pochłaniania dźwięku C

Table 9a. Sound absorption of the sample room taking into account the sound absorbing ceiling class C

Elementy pomieszczenia	Chłonność akustyczna [m ²]		
	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz
Chłonność akustyczna powierzchni ograniczających pomieszczenie $A_{\text{powierzchni}}$	80,24	97,94	100,63
Chłonność akustyczna wyposażenia $A_{\text{wyposazenie}}$	7,50	8,00	10,00
Chłonność akustyczna wynikająca z pochłaniania dźwięku przez powietrze A_{w}	0,69	1,15	2,18
Chłonność akustyczna pomieszczenia	88,43	107,09	112,81
Wymagana minimalna chłonność akustyczna pomieszczenia*	92,66	92,66	92,66

*wartości z tabeli 3. po przemnożeniu krotności przez pole powierzchni rzutu pomieszczenia

Tabela 9b. Chłonność akustyczna przykładowego pomieszczenia z uwzględnieniem dźwiękochłonnego sufitu podwieszanego klasy pochłaniania dźwięku A

Table 9b. Sound absorption sample room taking into account the sound absorbing ceiling class A

Elementy pomieszczenia	Chłonność akustyczna [m ²]		
	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz
Chłonność akustyczna powierzchni ograniczających pomieszczenie $A_{\text{powierzchni}}$	101,36	119,06	124,76
Chłonność akustyczna wyposażenia $A_{\text{wyposazenie}}$	7,50	8,00	10,00
Chłonność akustyczna wynikająca z pochłaniania dźwięku przez powietrze A_{w}	0,69	1,15	2,18
Chłonność akustyczna pomieszczenia	109,55	128,21	136,94
Wymagana minimalna chłonność akustyczna pomieszczenia*	92,66	92,66	92,66

*wartości z tabeli 3. po przemnożeniu krotności przez pole powierzchni rzutu pomieszczenia

- współczynnik pochłaniania dźwięku α powierzchni ograniczających pomieszczenie (dla częstotliwości 500, 1000 i 2000 Hz)

- chłonność akustyczną elementów wyposażenia (dla częstotliwości 500, 1000 i 2000 Hz)

- chłonność akustyczną wynikającą z pochłaniania dźwięku przez powietrze (dla częstotliwości 500, 1000 i 2000 Hz).

Następnie należy określić chłonność akustyczną pomieszczenia dla częstotliwości 500, 1000 i 2000 Hz wg wzoru 1.

Krok drugi – porównanie obliczonej wartości chłonności akustycznej pomieszczenia z wartością wymaganą minimalną

Otrzymany wynik chłonności akustycznej pomieszczenia (dla częstotliwości 500, 1000, 2000 Hz) porównuje się z wartościami wymaganymi minimalnymi (obliczonymi dla każdej częstotliwości na podstawie danych z tabeli 3. i pola powierzchni rzutu pomieszczenia). Jeżeli dla trzech częstotliwości wartości chłonności akustycznej pomieszczenia są większe od odpowiednich wymaganych minimalnych, pomieszczenie ma odpowiednie właściwości akustyczne, a więc nie trzeba zwiększać jego chłonności akustycznej. Jeżeli tak nie jest, chłonność akustyczną należy zwiększyć (krok trzeci).

Krok trzeci – zwiększenie chłonności akustycznej pomieszczenia

Jeżeli chłonność akustyczna pomieszczenia nie jest większa od wymaganej minimalnej, należy ją zwiększyć uwzględniając w projekcie zwiększenie chłonności akustycznej pomieszczenia przez zwiększenie chłonności akustycznej powierzchni ograniczających pomieszczenie albo elementów wyposażenia. W pierwszym przypadku powierzchnie ograniczające pomieszczenie (podłoga, ściany i strop) należy pokryć materiałami o większej chłonności akustycznej (lub przed nimi umieścić materiały dźwiękochłonne, jak to ma miejsce w przypadku dźwiękochłonných sufitów podwieszanych). W przypadku drugim można zastosować elementy wyposażenia o większej chłonności akustycznej lub zwiększyć ich liczbę (np. meble tapicerowane zamiast drewnianych czy metalowych).

Po zwiększeniu (w projekcie) chłonności akustycznej pomieszczenia należy sprawdzić, czy chłonność akustyczna pomieszczenia po uwzględnieniu nowych elementów spełnia wymagania (tj. wykonać działania określone w kroku drugim).

W pomieszczeniach biurowych zastosowanie dźwiękochłonnego sufitu podwieszanego jest najbardziej efektywnym i wystarczającym sposobem uzyskania wymaganej chłonności akustycznej. Z tego względu przedstawiono przykład obliczeniowy uwzględnienia dwóch wariantów dźwiękochłonných sufitów podwieszanych w projekcie adaptacji akustycznej.

Przykład obliczeniowy projektowania adaptacji akustycznej pomieszczenia biurowego z uwzględnieniem dźwiękochłonnego sufitu podwieszanego

Krok pierwszy – określenie chłonności akustycznej pomieszczenia bez adaptacji akustycznej

Adaptację akustyczną projektuje się w pomieszczeniu otwartym do prac administracyjnych (tzw. open space) o wymiarach 11,7 x 7,2 x 3,4 m, kubaturze

286,416 m³ i polu powierzchni podłogi 84,24 m². Część betonowa stropu pomieszczenia (pomijając oprawy oświetleniowe) ma pole powierzchni 78,24 m² i wykonana jest z betonu szorstkiego. Część otynkowana trzech ścian bocznych (dwóch dużych o wymiarach 11,7 x 3,4 m i jednej małej o wymiarach 7,2 x 3,4 m) ma pole powierzchni 79,64 m² (na ścianie dużej są okna, na drugiej ścianie dużej są drzwi), a ściany wykonane są z betonu wykończonego tynkiem cementowo-wapiowym, malowanym. Czwarta ściana boczna (mała o wymiarach 7,2 x 3,4 m) ma pole powierzchni 24,48 m² i wykonana jest z płyty gipsowo-kartonowej o grubości 12,5 mm na stelażu stalowym z pustką 100 mm wypełnioną wełną mineralną. Okna na ścianie bocznej (dużej) mają pole powierzchni 22,4 m² i są typowe. Drzwi do pomieszczenia (na drugiej ścianie dużej) mają pole powierzchni 2 m² i są lekkie z pustką lub wypełnieniem piankowym. W suficie pomieszczenia znajdują się oprawy oświetleniowe o polu powierzchni 6 m². Na podłodze o polu powierzchni 84,24 m² znajduje się dywan z przędzy włosowej na piance poliuretanowej.

Wartości współczynników pochłaniania dźwięku materiałów oraz chłonności akustycznej elementów wyposażenia podanych w tabelach określono na podstawie danych z normy PN-B-02151-4 [1] oraz danych z bazy danych w programie ODEON.

W tabelach 4 – 7 przedstawiono wyniki obliczeń chłonności akustycznej pomieszczenia przed adaptacją akustyczną.

Krok drugi – porównanie obliczonej wartości chłonności akustycznej pomieszczenia z wartością wymaganą minimalną

Otrzymany wynik chłonności akustycznej rozpatrywanego pomieszczenia (dla każdej częstotliwości 500, 1000, 2000 Hz) porównuje się z wartościami wymaganymi minimalnymi chłonności akustycznej obliczonymi na podstawie danych z tabeli 3. i pola powierzchni rzutu pomieszczenia (tj. dla rozpatrywanego pomieszczenia 1,1 x 84,24 m² = 92,66 m²). Ponieważ dla wszystkich częstotliwości wartości chłonności akustycznej pomieszczenia bez adaptacji (wynosiły odpowiednio 54,03, 75,71 i 79,02 m²) są mniejsze od wymaganych minimalnych (tj. 92,66 m²), dlatego chłonność akustyczną pomieszczenia należy zwiększyć (krok trzeci).

Krok trzeci – zwiększenie chłonności akustycznej pomieszczenia poprzez adaptację akustyczną w formie dźwiękochłonnego sufitu podwieszanego

W rozważanym przykładzie ze względu na zbyt małą chłonność akustyczną pomieszczenia rozpatrzono zwiększenie chłonności akustycznej pomieszczenia przez zastosowanie dźwiękochłonnego sufitu podwieszanego. W obliczeniach nie należy uwzględnić go jako nowego elementu, gdyż zastąpi (zakryje) on pod względem akustycznym istniejący strop.

Wpływ dźwiękochłonnego sufitu podwieszanego na chłonność akustyczną pomieszczenia sprawdzono uwzględniając w nim zastosowanie kolejno dwóch materiałów dźwiękochłonnych klasy pochłaniania dźwięku: A i C (rys. 1.). Ze względów technicznych sufit dźwiękochłonny nie pokrywał całego stropu (odległość dźwiękochłonnego sufitu podwieszanego od ścian bocznych jest równa 0,5 m; pole powierzchni całego stropu wynosi 84,24 m²). Dlatego w obliczeniach stropu uwzględniono dźwiękochłonny sufit podwieszany (pole powierzchni 60,34 m²), oprawy oświetleniowe (pole

Tabela 10. Chłonność akustyczna przykładowego pomieszczenia przed zastosowaniem sufitu dźwiękochłonnego i po jego zastosowaniu

Tabela 10. Sound absorption sample room before and after using the sound absorption ceiling

Dźwiękochłonny sufit podwieszany	Chłonność akustyczna pomieszczenia [m ²]		
	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz
Bez dźwiękochłonnego sufitu podwieszanego	54,03	75,71	79,02
Dźwiękochłonny sufit podwieszany klasy pochłaniania dźwięku C	88,43	107,09	112,81
Dźwiękochłonny sufit podwieszany klasy pochłaniania dźwięku A	109,55	128,21	136,94
Wymagana minimalna chłonność akustyczna pomieszczenia	92,66	92,66	92,66

powierzchni 6 m²) oraz pozostałą część betonową stropu (pole powierzchni 17,9 m²). Wyniki obliczeń chłonności akustycznej powierzchni ograniczających pomieszczenie A_{powierzchni} z uwzględnieniem sufitu dźwiękochłonnego klasy C podano w tabeli 8a, a z uwzględnieniem sufitu dźwiękochłonnego klasy A – w tabeli 8b. Chłonność akustyczną pomieszczenia podano odpowiednio w tabelach 9a i 9b (chłonność akustyczna wyposażenia A_{wyposażenie} i chłonność akustyczna wynikająca z pochłaniania dźwięku przez powietrze A_{wp} nie ulegają zmianie, więc ich wartości przyjęto z tabel 5. i 6.).

W tabeli 10. podano chłonności akustyczne pomieszczenia przed zastosowaniem sufitu dźwiękochłonnego i po jego zastosowaniu.

Na podstawie wyników obliczeń podanych w tabeli 10. można stwierdzić, że po uwzględnieniu dźwiękochłonnego sufitu podwieszanego z materiałem dźwiękochłonnym klasy pochłaniania dźwięku C, wartość chłonności akustycznej pomieszczenia dla częstotliwości 500 Hz jest o około 4,2 m² mniejsza od wymaganej minimalnej. Wynika z tego, że zastosowany dźwiękochłonny materiał w suficie podwieszonym ma za słabe właściwości dźwiękochłonne (za mały współczynnik pochłaniania dźwięku). W przypadku zastosowania dźwiękochłonnego sufitu podwieszanego z materiałem dźwiękochłonnym klasy pochłaniania dźwięku A, wartości chłonności akustycznej pomieszczenia dla wszystkich częstotliwości (500, 1000 i 2000 Hz) znacznie przekraczają wartości wymagane minimalne, co znaczy, że osiągnięto wymagane chłonności akustyczne pomieszczenia dla wszystkich wymaganych częstotliwości [1].

Podsumowanie

W artykule podano metodykę postępowania przy projektowaniu adaptacji akustycznej pomieszczeń, której celem jest zapewnienie odpowiedniej chłonności akustycznej pomieszczeń biurowych. W metodyce uwzględnia się zapewnienie tej chłonności przez wprowadzenie do pomieszczenia różnych elementów dźwiękochłonnych. Ponieważ największy przyrost chłonności akustycznej pomieszczenia można uzyskać przez zastosowanie dźwiękochłonnych sufitów podwieszanych (duże pole powierzchni), skupiono się na dźwiękochłonnych sufitach podwieszanych. Podano metodę obliczania chłonności akustycznej pomieszczenia określoną w normie PN-B-02151-4 [1]. W przykładzie obliczeniowym określono chłonności akustyczne pomieszczenia bez i z dwoma dźwiękochłonnymi sufitami podwieszonymi.

W rozpatrywanym przykładzie skutecznym i wystarczającym sposobem zwiększenia chłonności akustycznej pomieszczenia jest zastosowanie dźwiękochłonnego sufitu podwieszanego klasy pochłaniania dźwięku A (wartość ważonego współczynnika pochłaniania dźwięku α_w , większa lub równa 0,9), natomiast zastosowanie sufitu podwieszanego z materiałem klasy pochłaniania dźwięku C (wartość ważonego współczynnika pochłaniania dźwięku α_w , z zakresu 0,6 – 0,75) nie pozwala uzyskać wymaganej minimalnej w normie chłonności

akustycznej pomieszczenia [1]. Nie dyskredytuje to zastosowania tego drugiego, jednakże w tym przypadku konieczne jest dodatkowo zwiększenie chłonności akustycznej pomieszczenia np. przez pokrycie części ścian materiałem dźwiękochłonnym.

Uwzględnienie w procesie projektowania adaptacji akustycznej obliczania chłonności akustycznej jest niezbędne do uzyskania wymaganych warunków akustycznych. Zaznaczyć jednak należy, że wyniki obliczeń chłonności akustycznej pomieszczenia za pomocą metody podanej w normie [1] są przybliżone, głównie z powodu przybliżonego oszacowania współczynników pochłaniania dźwięku powierzchni ograniczających pomieszczenie oraz przybliżonego oszacowania chłonności akustycznej elementów wyposażenia. Zatem, po wykonaniu adaptacji akustycznej, konieczne jest zweryfikowanie pomiarowe właściwości akustycznych pomieszczenia (np. przez pomiar czasu pogłosu).

Wiele pomieszczeń, ze względu na specyfikę wykonywanych w nich prac, musi spełniać wymagania akustyczne, w przypadku których zapewnienie tylko odpowiedniej chłonności akustycznej pomieszczenia jest niewystarczające. Dlatego w pomieszczeniach tych określa się wymagania akustyczne dodatkowo poprzez inne wielkości fizyczne (np. w pomieszczeniach biurowych *open space* – wskaźnik transmisji mowy STI oraz cztery inne [5,6,7,8]).

BIBLIOGRAFIA

[1] 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
 [2] PN-EN ISO 11654:1999 Akustyka. Wyroby dźwiękochłonne używane w budownictwie. Wskaźnik pochłaniania dźwięku
 [3] Mikulski W. Wyniki badań wpływu adaptacji akustycznych sal lekcyjnych na jakość komunikacji werbalnej. „Medycyna Pracy” 2013,64,2:207-215 DOI: 10.13075/mp.5893/2013/0017
 [4] Mikulski W. Schemat postępowania przy projektowaniu adaptacji akustycznej pomieszczeń edukacyjnych. „Bezpieczeństwo Pracy. Nauka i Praktyka” 2013,498,3:20-23
 [5] PN-EN ISO 3382-3:2012 Akustyka – Pomiar parametrów akustycznych pomieszczeń – Część 3: Pomieszczenia biurowe typu „open space”
 [6] Mikulski W., Warmiak I. Obiektywne kryteria oceny właściwości akustycznych otwartych pomieszczeń biurowych. „Bezpieczeństwo Pracy. Nauka i Praktyka” 2015,530,11:18-21
 [7] Radosz J. Global Index of the Acoustic Quality of Classrooms. “Archives of Acoustics” 2013, Vol. 38, Issue 2:159-168
 [8] Mikulski W., Warmiak I. Metoda określania wskaźnika transmisji mowy STI i poziomu dźwięku A mowy w pomieszczeniach biurowych *open space*. Monografia „Postępy Akustyki” Wrocław 2015

Publikacja opracowana na podstawie wyników III etapu programu wieloletniego pn. „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy”, dofinansowanego 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.