

dr hab. inż. Witold Mikulski, prof. CIOP-PIB¹⁾
ORCID: 0000-0002-2387-9631

Środowisko akustyczne wg ISO 22955:2021 i PN-EN ISO 3382-3:2022 w biurowych open space

Acoustic environment in open space offices by ISO 22955:2021 and EN ISO 3382-3:2022

DOI: 10.15199/33.2023.06.04

Streszczenie. Celem badań symulacyjnych było określenie technicznych środków umożliwiających uzyskanie warunków środowiska akustycznego w pomieszczeniach biurowych open space wg ISO 22955:2021 i PN-EN ISO 3382-3:2022. Uzyskanie odpowiedniej chłonności akustycznej wymaga zastosowania sufitu dźwiękochłonnego, a w celu zmniejszenia poziomu dźwięku w funkcji odległości niezbędne jest zastosowanie materiałów dźwiękochłonnych na ścianach oraz ekranów akustycznych. Uzyskanie odpowiedniego zmniejszenia zrozumiałości mowy wymaga także zastosowania dźwięków maskujących.

Słowa kluczowe: biurowe open space; adaptacja akustyczna; czas pogłosu; STI; maskowanie dźwięków.

Abstract. The purpose of the simulation tests was to determine the technical means to obtain appropriate acoustic environment conditions in an open-plan office room (e.g. ISO 22955:2021 and EN ISO 3382-3:2022). Achieving adequate sound absorption requires the use of a sound-absorbing ceiling. Obtaining SPL attenuation of the distance requires the use of sound-absorbing materials on walls and acoustic screens. Achieving adequate reduction of speech intelligibility also requires the use of masking sounds.

Keywords: open-plan office rooms; acoustic treatment; reverberation time; STI; masking sound.

W nowoczesnych budynkach przeznaczonych do pracy biurowej coraz powszechniej wykorzystuje się duże pomieszczenia przeznaczone do pracy kilkudziesięciu osób [1 ÷ 3]. Wymagania dotyczące środowiska pracy biurowej w tych pomieszczeniach (w literaturze stosuje się także inne ich nazwy: biurowe open space, biurowe pomieszczenia wielkoprzestrzenne) są większe [4 ÷ 8] niż w przypadku małych pomieszczeń biurowych [4 ÷ 6]. Wynika to z dodatkowej uciążliwości środowiska akustycznego w tych pierwszych pomieszczeniach wynikającej z propagacji dźwięku w obszarach o dużej objętości (większy pogłos) oraz z dużo większej liczby źródeł hałasu (duża liczba pracujących ludzi) [9 ÷ 11]. W związku z tym, że wpływ na uciążliwość hałasu w tych pomieszczeniach ma rozumienie niepożądanego treści rozmów, w ostatnim czasie, jako dodatkowy do adaptacji akustycznej środek techniczny poprawiający właściwości tego środowiska pracy, uwzględnia się dźwięki maskujące mowę [12 ÷ 14]. W dotychczasowej praktyce projektowej

i wykonawczej, wprowadzenie do pomieszczenia źródeł maskujących nie jest powszechnie stosowane [15 ÷ 19].

W Polsce, z punktu widzenia obligatoryjności wymagań/zaleceń akustycznych dotyczących biurowych pomieszczeń open space, można je określić jako: obowiązujące (wg norm powołanych w rozporządzeniu [4], tj. PN-B-02151-2 [5] i PN-B-02151-4:2015 [6]) oraz dobrowolne/zalecane (wg znowelizowanej PN-EN ISO 3382-3:2022 [7] i nowej normy ISO 22955:2021 [8]). Ta ostatnia [8] jest nową normą, która kompleksowo uwzględnia warunki akustyczne w rozpatrywanych pomieszczeniach [20] poza warunkami na zrozumiałość mowy podanymi w PN-EN ISO 3382-3 [7], a także w PN-EN 60268-16:2021 [21]. W artykule rozpatruje się tylko wymagania akustyczne wewnątrz pomieszczeń, natomiast istnieją także inne wymagania akustyczne dotyczące biurowych budynków open space, np. dotyczące izolacyjności akustycznej wg PN-B-02151-3:2015 [22]. Na przykładzie pomieszczenia biurowego open space o kubaturze 560 m³, z 36 stanowiskami pracy, podano wyniki badań wpływu różnych technicznych środków adaptacji akustycznej pomieszczenia

(materiały dźwiękochłonne, ekrany akustyczne itp.) oraz źródeł maskujących na spełnienie wymagań/zaleceń określonych w PN-B-02151-2 [5], PN-B-02151-4:2015 [6], PN-EN ISO 3382-3 [7] oraz ISO 22955 [8].

Metoda badań i dane wejściowe rozpatrywanego przypadku

Badanie dotyczyło pomieszczenia biurowego open space o wymiarach 20 x 8 x 3,5 m (kubatura 560 m³; rysunek 1). Właściwości akustyczne elementów wyposażenia oraz elementów adaptacji akustycznej (określone za pomocą współczynnika pochłaniania dźwięku α i/lub wskaźnika pochłaniania dźwięku α_w) przyjęto wg bazy danych programu ODEON do symulacji pola akustycznego w pomieszczeniach [23]. **Badania przeprowadzono dwiema metodami obliczeniowymi.**

Metoda 1. Jednostkową chłonność akustyczną A_{1m2} [m²] obliczono standardową metodą obliczeniową podaną w obligatoryjnej do stosowania w Polsce PN-B-02151-4:2015 [6], tzn. wg wzoru:

$$A_{1m2} = (A_{\text{powierzchni}} + A_{\text{wyposażenia}} + A_{\text{air}}) / S_p = (\sum_{i=0}^n \alpha_i \cdot S_i + \sum_{j=0}^o A_{\text{wypj}} + 4mV) / S_p \quad [1]$$

¹⁾ Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy, Zakład Zagrożeń Wibroakustycznych; wimik@ciop.pl

gdzie:

$A_{powierzchni}$ – chłonność akustyczna powierzchni pomieszczenia (ścian, podłogi, stropu itp.) [m²];

$A_{wyposażenia}$ – chłonność akustyczna elementów wyposażenia [m²];

A_{air} – chłonność akustyczna wynikająca z pochłaniania dźwięku w powietrzu [m²];

S_p – pole powierzchni podłogi [m²];

n – liczba powierzchni pomieszczenia;

α_i – współczynnik pochłaniania dźwięku i-tej powierzchni pomieszczenia;

S_i – pole powierzchni i-tej powierzchni pomieszczenia [m²];

o – liczba elementów wyposażenia, dla których określono chłonność akustyczną;

$A_{wyp.j}$ – chłonność akustyczna j-tego elementu wyposażenia [m²];

m – mocowy współczynnik pochłaniania dźwięku w powietrzu, w neperach na metr;

V – kubatura pomieszczenia [m³].

Wyniki obliczeń przedstawiono w tabeli 1.

Metoda 2. Pozostałe parametry kryterialne (wg PN-EN ISO 3382-3 [7] i ISO 22955 [8]) obliczono metodą geometrycznej symulacji pola akustycznego w pomieszczeniach, zaimplementowaną w programie komputerowym ODEON (wersja programu 16.07; parametry obliczeniowe: number of late rays 16000; transition order 2; screen diffraction Actual; reflection scatter Enabled; key diffraction frequency 707 Hz; interior margin 0,1m; reflection scattering coefficients > 0,5) [23]. Nowy parametr – **dystans komfortu** (*comfort distance*) wg PN-EN ISO 3382-3:2022 [7], określono z wzoru:

$$r_c = 2[(L_{p,A,S,4m} - 45 + 2 \cdot D_{2,S}) / D_{2,S}] [m] \quad [2]$$

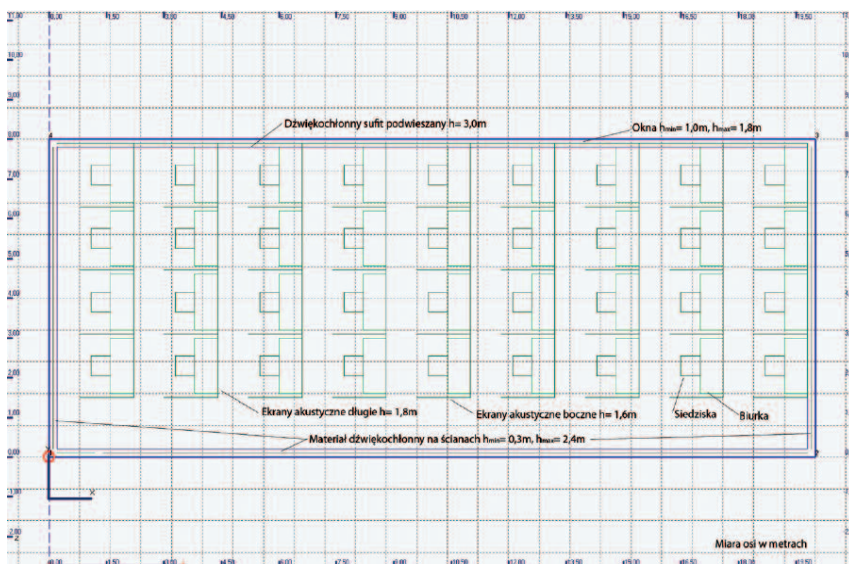
gdzie:

$L_{p,A,S,4m}$ – poziom dźwięku A w odległości 4 m od wzorcowego źródła mowy [dB];

$D_{2,S}$ – spadek poziomu dźwięku A na podwojenie odległości od wzorcowego źródła mowy [dB].

Ocenę wykonano, porównując obliczone wartości kryterialne z ich wartościami dopuszczalnymi podanymi w PN-B-02151-2 [5], PN-B-02151-4 [6], PN-EN ISO 3382-3 [7] i ISO 22955 [8]. Bardziej szczegółowy opis metody znajduje się w [3, 18, 19]. W obliczeniach uwzględniono tło akustyczne i dźwięki maskujące o poziomie dźwięku A i widmie podanym w tabeli 2.

W celu ujednoczenia opisu, kryteria akustyczne oceny rozpatrywanych pomieszczeń pogrupowano wg wymagań właściwości akustycznych pomieszczeń, od najłatwiejszych do najtrudniejszych do uzyskania, i przy tej kolejności etapów postępowania w projektowaniu akustycznym pomieszczeń.



Rys. 1. Rzut rozpatrywanego biurowego pomieszczenia open space uwzględnionego w badaniach wg ODEON [23]

Fig. 1. Plan of the open space office room included in the research by ODEON [23]

Tabela 1. Wyniki obliczeń jednostkowej chłonności akustycznej pomieszczenia w przypadku wariantów adaptacji akustycznej nr 5 i 6

Table 1. Calculations results of unit sound absorption for variants of acoustic treatment no. 5 and 6

Elementy pomieszczenia wpływające na chłonność akustyczną pomieszczenia	Liczba elementów	Pole powierzchni elementów [m ²]	Współczynnik pochłaniania dźwięku α			Chłonność akustyczna A [m ²]		
			500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz
Sufit betonowy	1	11	0,06	0,07	0,09	0,7	0,8	1,0
Dźwiękochłonny sufit podwieszany	1	149	0,96	0,97	0,99	143,0	144,5	147,5
Wykładzina podłogowa	1	160	0,21	0,26	0,27	33,6	41,6	43,2
Ściana nr 1, długa z oknem; część betonowa	1	34,7	0,06	0,07	0,09	2,1	2,4	3,1
Okna	1	35,3	0,18	0,12	0,07	6,4	4,2	2,5
Ściana nr 2, długa z drzwiami (bez uwzględnienia drzwi i materiału dźwiękochłonnego), część betonowa	1	23,84	0,06	0,07	0,09	1,4	1,7	2,1
Drzwi	1	2	0,1	0,09	0,08	0,2	0,2	0,2
Materiał dźwiękochłonny na ścianie nr 2, długiej z drzwiami	1	44,16	0,88	0,99	0,95	38,9	43,7	42,0
Ściana nr 3, krótka (bez uwzględnienia materiału dźwiękochłonnego), część betonowa	1	9,76	0,06	0,07	0,09	0,6	0,7	0,9
Materiał dźwiękochłonny na ścianie nr 3, krótkiej	1	18,24	0,88	0,99	0,95	16,1	18,1	17,3
Ściana nr 4, krótka (bez uwzględnienia materiału dźwiękochłonnego), część betonowa	1	9,76	0,06	0,07	0,09	0,6	0,7	0,9
Materiał dźwiękochłonny na ścianie nr 4, krótkiej	1	18,24	0,88	0,99	0,95	16,1	18,1	17,3
Siedziska	36	18	0,58	0,61	0,58	10,4	11,0	10,4
Biurka	36	60,48	0,1	0,09	0,08	6,0	5,4	4,8
Ekran akustyczny, boczny (pokryte materiałem dźwiękochłonnym obustronnie)	36	161,28	0,88	0,99	0,95	149,9	159,7	153,2
Ekran akustyczny, długi (pokryte materiałem dźwiękochłonnym obustronnie)	9	210,6	0,88	0,99	0,95	185,3	208,5	200,1
Chłonność powietrza						1,3	2,2	3,8
Chłonność akustyczna pomieszczenia [m ²]						604,6	663,4	650,3
Jednostkowa chłonność akustyczna pomieszczenia A_{1m^2} [m ²]						3,78	4,15	4,06

Tabela 2. Poziomy ciśnienia akustycznego i dźwięku A uwzględnianego tła akustycznego z dźwiękiem maskującym
Table 2. Sound pressure levels and A-weighted background noise level with masking sound

Wariant adaptacji akustycznej	Poziomy ciśnienia akustycznego w oktaowych pasmach częstotliwości [dB]								Poziomy ciśnienia akustycznego [dB]	
	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz	charakterystyka A	liniowy 125 – 8000 Hz
	0, 1, 2, 3, 4, 5 (tło akustyczne)	47	36	29	22	17	14	12	11	27,1
6 (tło akustyczne z dźwiękiem maskującym)	47	36	29	24,2	24,2	24,2	24,2	24,2	32,0	37,8
6' (tło akustyczne z dźwiękiem maskującym)	47	36	30	30	30	30	30	30	37,0	40

Uwaga do tabeli 2: zgodnie z PN-EN ISO 3382-3:2022 [7] w przypadku tzw. dobrych właściwości akustycznych poziom ciśnienia akustycznego (liniowy w zakresie częstotliwości obejmującym pasmo oktaowe o częstotliwościach środkowych 125 – 8000 Hz) powinien wynosić 40 – 45 dB. Zalecenie to nie znajdowało się w poprzedniej wersji normy, tj. PN-EN ISO 3382-3:2012. Inne parametry (na podstawie poziomu dźwięku A) określone w tabeli 3 uwzględniają przy ich wyznaczaniu także pasmo częstotliwości 63 Hz. Jest to niekonsekwencja, dlatego nie znajdują uzasadnienia do podwyższenia poziomu tła akustycznego względem rozpatrywanego w wariancie 6 (patrz wariant 6'), gdyż nie wpływa to na żadne inne kryteria akustyczne, a naraża pracownika na większy hałas (tabela 3).

Kryteria akustyczne (tabela 3):

● I – dotyczące uzyskania odpowiednich właściwości pogłosowych pomieszczenia (wg ISO 22955:2021 [8] określanych jako „niezbędne do ograniczenia nieodłącznego wpływu wzmocnienia hałasu w pomieszczeniu”); określono dwa parametry:

1) jednostkową chłonność akustyczną pomieszczenia A_{1m2} w oktaowych pasmach częstotliwości o częstotliwościach środkowych 500, 1000 i 2000 Hz:

- bez wyposażenia pomieszczenia, ale z dźwiękochłonnym sufitem podwieszanym (wariant 1 adaptacji), kryterium wg ISO 22955 [8];
- z dźwiękochłonnym sufitem podwieszanym, biurkami i siedziskami (warianty adaptacji akustycznej 2 – 6 i 6'), kryterium wg PN-B-02151-4 [6];

2) czas pogłosu w pasmach częstotliwości T_p , kryterium wg ISO 22955 [8] (warianty adaptacji akustycznej 2 – 6 i 6'):

- $T_{125\text{ Hz}}$ w oktaowym paśmie częstotliwości o częstotliwości środkowej 125 Hz;
- $T_{sr250-4000\text{ Hz}}$ średnia arytmetyczna z czasów pogłosu w oktaowych pasmach częstotliwości o częstotliwościach środkowych 250, 500, 1000, 2000 i 4000 Hz;

● II – dotyczące ograniczenia propagacji dźwięku, określane poziomem dźwięku A (od wzorcowego źródła mowy) warianty adaptacji akustycznej 2 – 6 i 6'; określono cztery parametry:

- poziom dźwięku A w odległości 4 m (od wzorcowego źródła mowy) $L_{A,S,4\text{ m}}$, kryterium wg PN-EN ISO 3382-3 [7];

- spadek poziomu dźwięku A na podwojenie odległości (od wzorcowego źródła mowy) $D_{2,S}$, kryterium wg PN-EN ISO 3382-3 [7];

- poziom dźwięku A na tzw. sąsiednich stanowiskach pracy $L_{A,S,near}$ (rysunek 2a i 2b), kryterium wg PN-EN ISO 3382-3 [7];

- dystans (odległość) komfortu r_c , kryterium wg PN-EN ISO 3382-3 [7];

III – dotyczące ograniczenia zrozumiałości mowy, warianty adaptacji akustycznej 2 – 6 i 6'; określono dwa parametry:

- promień (odległość) rozproszenia r_p , kryterium wg PN-EN ISO 3382-3 [7];

- wskaźnik transmisji mowy STI_{near} na tzw. sąsiednich stanowiskach pracy (rysunki 2a i 2b; w tabeli 3 wewnątrz odpowiednich pól podano wyniki: w linii górnej dotyczące punktów na rysunku 2a, a w linii dolnej punktów na rysunku 2b), kryterium wg ISO 22955 [8].

Badania przeprowadzono kolejno, uwzględniając coraz większą adaptację akustyczną oraz dźwięki maskujące. Uwzględniane warianty adaptacji akustycznej i dźwięków maskujących:

0) pomieszczenie puste (wskaźnik pochłaniania dźwięku $\alpha_{w,ścian} = 0,1$; klasa pochłaniania dźwięku „,-,-”); tło akustyczne naturalne niskoczęstotliwościowe o poziomie dźwięku A 27,1 dB (podano je w tabeli 2);

1) pomieszczenie jak w wariancie 0 z dodatkowym sufitem podwieszanym ($\alpha_{w,sufitu\text{ podwieszanego}} = 0,95$; klasa pochłaniania dźwięku A);

2) pomieszczenie jak w wariancie nr 1 oraz z siedziskami i biurkami ($\alpha_{w,siedzisk}$

= 0,6; klasa pochłaniania dźwięku C; $\alpha_{w,biurek} = 0,1(L)$; klasa pochłaniania dźwięku „,-,-”);

3) pomieszczenie jak w wariancie nr 2 i z dźwiękochłonną wykładziną podłogową ($\alpha_{w,wykładziny} = 0,25$; klasa pochłaniania dźwięku E);

4) pomieszczenie jak w wariancie nr 3 oraz z materiałami dźwiękochłonnymi na trzech ścianach (rysunek 1; $\alpha_{w,materiał\ na\ ścianach} = 0,85$; klasa pochłaniania dźwięku B);

5) pomieszczenie jak w wariancie nr 4 oraz z ekranami akustycznymi (rysunek 1; $\alpha_{w,materiał\ na\ ekranach} = 0,85$; klasa pochłaniania dźwięku B);

6) pomieszczenie jak w wariancie nr 5 i dodatkowy dźwięk maskujący o widmie szumu różowego; wypadkowy poziom dźwięku A 32,0 dB (tabela 2);

6') pomieszczenie jak w wariancie nr 6 i dźwięk maskujący o widmie szumu różowego; wypadkowy poziom dźwięku A 37,0 dB (tabela 2).

Wyniki badań

Wyniki badań podano w tabelach 1 i 3 oraz na rysunkach 3 i 4. Wyniki w tabeli 1 uzyskano metodą obliczeniową I wg normy PN-B-02151-4 [6] w przypadku wariantu nr 6 adaptacji akustycznej, tj. z zastosowaniem dźwiękochłonnego sufitu podwieszanego, dźwiękochłonnej wykładziny podłogowej, ekranów akustycznych, biurek i siedzisk oraz dźwięku maskującego z wypadkowym tłem akustycznym o poziomie dźwięku A 32 dB. Te środki umożliwiają uzyskanie jednostkowej chłonności akustycznej (w pasmach częstotliwości 500, 1000 i 2000 Hz) mieszczącej się w zakresie 3,78 – 4,06 m² (tj. znacznie przekraczającej minimalną obligatoryjną wg PN-B-02151-4 [6] równą 1,1 m²). Jednocześnie dopiero te środki umożliwiają uzyskanie wszystkich kryteriów podanych także w PN-EN ISO 3382-3 [7] i ISO 22955 [8] (tabela 3).

W tabeli 3 podano wyniki obliczeń parametrów kryterialnych w kolejnych etapach projektowania/uwzględnienia elementów adaptacji akustycznej i dźwięku maskującego.

Wariant 0 – puste pomieszczenie.

W celach informacyjnych (brak kryteriów/zaleceń) określono dane pustego pomieszczenia (wariant 0).

Tabela 3. Wyniki obliczeń i oceny różnych wariantów adaptacji akustycznej rozpatrywanego pomieszczenia
 Table 3. Results of calculations and evaluation of various variants of acoustic treatment of the considered room

Warianty adaptacji akustycznej	Zastosowane elementy adaptacji akustycznej i źródła maskujące					Wyniki odnoszące się do ograniczenia właściwości pogłosowych pomieszczenia					Wyniki odnoszące się do ograniczenia poziomu dźwięku mowy					Wyniki odnoszące się do ograniczenia zrozumiałości mowy	
	dźwiękochłonny sufit podwieszany	biurka i siedziska	wykładzina dźwiękochłonna	materiał dźwiękochłonny na ścianach	ekrany akustyczne	jednostkowa chłonność akustyczna $A_{m,f}$ [m ²]			czas pogłosu pomieszczenia T_r (wg ISO 22955 [20]), [s]		poziom dźwięku A w odległości 4 m, $L_{A,S,4m}$ wg PN-EN ISO 3382-3 [7] [dB]	spadek poziomu dźwięku A na podwojenie odległości D_s , wg 3382-3 [7] [dB]	poziom dźwięku A na sąsiednim stanowisku pracy $L_{A,S,near}$ z $D_{A,S}$ wg ISO 22955 [8] [dB] (źródło na środku pomieszczenia /źródło przy ścianie bocznej)	dystans komfortu r_c wg 3382-3 [7] [dB]	promień rozproszania wg PN-EN ISO 3382-3 [7] r_D [m]	wskaźnik transmisji mowy na sąsiednim stanowisku, STI_{near} wg ISO 22955 [8]; (źródło na środku pomieszczenia /źródło przy ścianie bocznej)	
						500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	$T_{125 Hz}$	$T_{sr250-4000 Hz}$							
Kryterium wg ISO 22955 [8] pomieszczenia „puste” z sufitem podwieszonym						≥ 0,9 m ² (wariant nr 1)											
Kryterium dotyczące pomieszczeń eksploatacyjnych						≥ 1,1 m ² (wg PN-B-02151-4 [6]) (warianty nr 2-6)			≤ 0,8 s	≤ 0,5	< 48 wg PN-EN ISO 3382-3 [7] ≤ 47 wg ISO 22955 [8]	> 8	≤ 51,4	< 5	< 5	≤ 0,6	
0	-	-	-	-	27,1 {27,1}	0,23	0,25	0,31	1,25	1,70	57,8	0,73-0,75	58,1-59,1 /58,4-59,3	64,4 /66,2	22,8-25,0	0,54-0,59 /0,59-0,65	
1	+	-	-	-	27,1 {27,1}	1,07 (wg ISO 22955 [8])	1,09 (wg ISO 22955 [8])	1,15 (wg ISO 22955 [8])	0,81	1,05	51,9	2,48-2,51	52,8-55,5 /53,8-56,5	20,24	35,75-33,79	0,75-0,83 /0,82-0,88	
2	+	+	-	-	27,1 {27,1}	1,17	1,19	1,24	0,61	0,80	50,6	2,80-2,86	51,1-55,4 /52,4-56,5	15,77	33,3-33,9	0,75-0,86 /0,83-0,91	
3	+	+	+	-	27,1 {27,1}	1,32	1,38	1,42	0,61	0,80	50,4	2,85-2,93	51,0-55,2 /52,3-56,3	14,61	33,0-33,1	0,76-0,87 /0,83-0,91	
4	+	+	+	+	27,1 {27,1}	1,73	1,85	1,86	0,58	0,28	47,3-47,8	4,39-4,57	49,4-54,8 /49,7-54,9	5,93	29,82-30,81	0,88-0,95 /0,90-0,96	
5	+	+	+	+	27,1 {27,1}	3,78	4,15	4,06	0,4	0,11	30,9-31,0	7,91-8,15	35,6-41,7 /36,2-41,9	1,19	2,94-3,03	0,62-0,77 /0,63-0,78	
6	+	+	+	+	32 {27,1}	3,78	4,15	4,06	0,4	0,11	30,9-31,0	8,03=7,91-8,15	35,6-41,7 /36,2-41,9	1,19	niewyznaczalny	0,41-0,56 /0,42-0,57	
6'	+	+	+	+	37 {27,1}	3,78	4,15	4,06	0,4	0,11	30,9-31,0	8,03=7,91-8,15	35,6-41,7 /36,2-41,9	1,19	niewyznaczalny	0,31-0,45 /0,31-0,45	

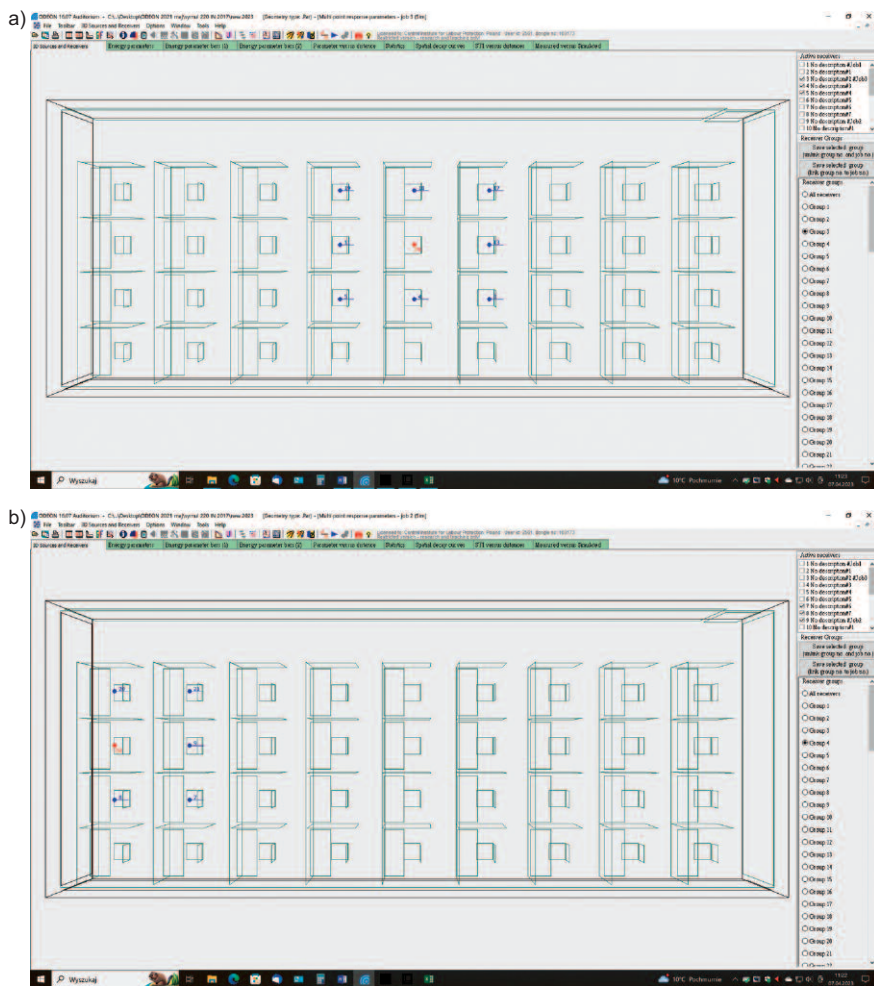
Zarówno bardzo mała jednostkowa chłonność akustyczna pomieszczenia (0,23 – 0,31 m²), jak i bardzo duże czasy pogłosu (1,25 – 1,7 s) wskazują na bardzo dużą pogłosowość pomieszczenia (tabela 3). Wynika z tego (co jest oczywiste), że pomieszczenie puste nie nadaje się pod względem uciążliwości akustycznej do pracy umysłowej ludzi.

Wariant 1 adaptacji akustycznej pomieszczenia. Uwzględnienie tylko dźwiękochłonnego sufitu podwieszanego (bez wyposażenia stanowisk pracy).

Wariant ten umożliwił spełnienie kryterium na jednostkową chłonność akustyczną (wg ISO 22955 [8]), która wyniosła 1,07 – 1,15 m² (wymagana minimalna 0,9 m²). Żadne inne kryteria, tj. PN-B-02151-4:2015 [6] i PN-EN ISO 3382-3 [7], nie odnoszą się do pomieszczeń bez stanowisk pracy. W dalszych wariantach uwzględniono już wyposażenie stanowisk pracy.

Wariant 2 adaptacji akustycznej pomieszczenia. Poza dźwiękochłonnym sufitem podwieszonym uwzględniono w nim wyposażenie stanowisk pracy

(drewniane biurka oraz miękkie siedziska z oparciami). Jednostkowa chłonność akustyczna wyniosła 1,17 – 1,24 m² (minimalna wg PN-B-02151-4 [6] wynosi 1,1 m²). Wariant ten spełnia więc kryterium obowiązkowe wg PN-B-02151-4. W przypadku tego wariantu adaptacji akustycznej określono także warunki pogłosowe wg ISO 22955 [8] i niestety kryterium odnoszące się do średniej wartości czasu pogłosu z zakresu częstotliwości 250 – 4000 Hz $T_{sr250-4000 Hz}$ nie jest spełnione (z obliczeń wynosi 0,8 s, a maksymalna dopuszczalna wartość jest rów-



Rys. 2. Widok od góry rozpatrywanego biurowego pomieszczenia open space uwzględnionego w badaniach. Kolorem czerwonym zaznaczono wzorcowe źródła mowy: P2 (źródło z boku pomieszczenia) lub P3 (źródło w środku pomieszczenia). Kolorem niebieskim pokazano punkty obliczeniowe, na których określano poziomy dźwięku A $L_{A,S, near}$ i wskaźnik transmisji mowy STI_{near} wg ODEON [23]. Opis w artykule

Fig. 2. Top view of the open space office room included in the research. The reference speech source P2 (source on the side of the room) or P3 (source in the middle of the room) are shown in red. The blue colour shows the calculation points where A -weighted sound pressure levels $L_{A,S, near}$ and the speech transmission index STI_{near} were determined by ODEON [23]. Description in article

na 0,5 s). Pozostałe kryteria wg ISO 22955 [8] i PN-EN ISO 3382-3 [7] też nie są spełnione (tabela 3), ponieważ zastosowanie tylko dźwiękochłonnego sufitu podwieszanego oraz biurki i miękkich siedzących nie zapewnia zadowalających warunków akustycznych w tym pomieszczeniu, choć spełniają one jedyne kryterium obligatoryjne w Polsce, tj. wg PN-B-02151-4 [6].

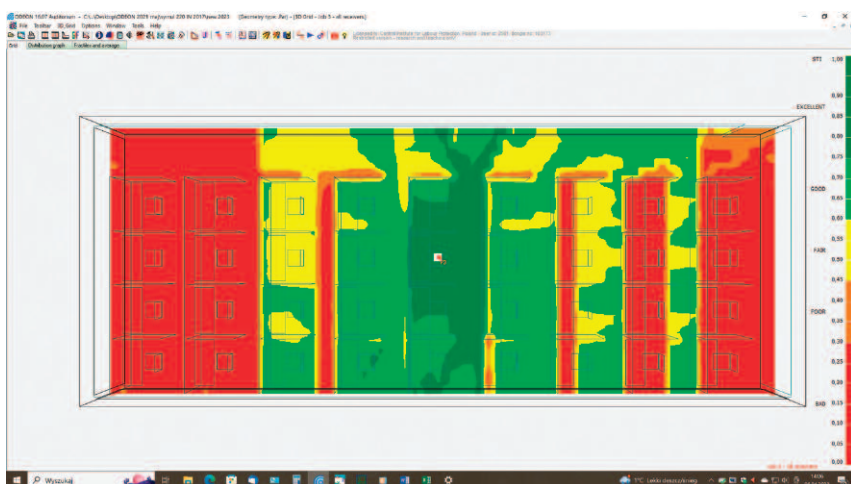
Wariant 3 adaptacji akustycznej pomieszczenia. Dodatkowe (poza dźwiękochłonnym sufitem podwieszonym, biurkami i siedzących) uwzględnienie dźwiękochłonnej wykładziny podłogowej nie wpływa (poza zwiększeniem jednostkowej chłonności aku-

stycznej obliczanej wg PN-B-02151-4 [6]) na pozostałe parametry kryterialne (tabela 3). Efekt ten jest zastanawiający w odniesieniu do czasu pogłosu, gdyż wynika z niego, że nie ma liniowej relacji między czasem pogłosu obliczonym metodami symulacyjnymi oraz jednostkową chłonnością akustyczną obliczaną wg PN-B-02151-4 [6]. Nie można więc stosować tzw. wzoru Sabine'a i innych podobnych. W uproszczeniu efekt ten jest więc nie skutkiem geometrii pomieszczenia, lecz nierównomiernego rozmieszczenia materiałów dźwiękochłonnych (standardowy efekt tworzenia pogłosu między najmniej odległymi ścianami jest zaburzony przez dźwięko-

chłonny sufit podwieszony o bardzo dobrych właściwościach pochłaniania dźwięku. Wówczas efekt pogłosowości jest także tworzony przez przeciwległe pary ścian bocznych pomieszczenia. Celem jest więc zastosowanie materiałów dźwiękochłonnych na ścianach bocznych rozpatrywanego pomieszczenia.

Wariant 4 adaptacji akustycznej pomieszczenia. Dodatkowe (poza dźwiękochłonnym sufitem podwieszonym, biurkami i siedzących oraz dźwiękochłonną wykładziną podłogową) uwzględnienie materiałów dźwiękochłonnych na ścianach umożliwia spełnienie kryteriów na pogłosowość pomieszczenia (jednostkowa chłonność akustyczna wg PN-B-02151-4 [6] oraz czas pogłosu wg ISO 22955 [8], tabela 3). Niespełnione są natomiast pozostałe kryteria wg PN-EN ISO 3382-3 [7] i ISO 22955 [8] (tabela 3), ponieważ wymagany minimalny spadek poziomu dźwięku na podwojenie odległości $D_{2,S}$ jest wg PN-EN ISO 3382-3 [7] równy 8 dB (w poprzedniej wersji tej normy z 2012 r. wynosił 7 dB), tzn., że wymagany jest znacznie większy spadek niż nawet w przestrzeni otwartej (6 dB). Wynika z tego, że konieczne jest zastosowanie ekranów akustycznych rozdzielających stanowiska pracy (ekranowanie fali bezpośredniej od źródła dźwięku).

Wariant 5 adaptacji akustycznej pomieszczenia. Dodatkowe (poza dźwiękochłonnym sufitem podwieszonym, biurkami i siedzących, dźwiękochłonną wykładziną podłogową oraz materiałami dźwiękochłonnymi na ścianach) uwzględnienie ekranów akustycznych (rysunek 1, tabela 1) umożliwia spełnienie wymagań na warunki pogłosowe (jednostkowa chłonność akustyczna i czas pogłosu), spełnienie kryteriów na ograniczenie poziomu propagowanego dźwięku wg PN-EN ISO 3382-3 [7], tj. uzyskanie spadku poziomu dźwięku A na podwojenie odległości $D_{2,S}$ równego 8,03 dB (wymagany minimalny 8 dB; tabela 3) i poziomu dźwięku A w odległości 4 m $L_{A,S, 4m}$ 31 dB (wymagany maksymalny 47 – 48 dB). Na rysunku 3 pokazano na płaszczyźnie poziomej, na wysokości 1,2 m od podłogi, rozkład wartości wskaźnika transmisji mowy STI ilustrujący zasięg zrozumiałości mowy wzorcowego źródła mowy



Rys. 3. Rozkład na płaszczyźnie poziomej ($h = 1,2$ m) wartości wskaźnika transmisji mowy STI w przypadku wariantu adaptacji akustycznej nr 5 (dźwiękochłonny sufit podwieszany, wykładzina dźwiękochłonna, materiał dźwiękochłonny na ścianach, ekrany akustyczne, biurka i siedziska oraz tło akustyczne niskoczęstotliwościowe 27,1 dB) wg ODEON [23]

Fig. 3. Distribution on the horizontal plane ($h = 1.2$ m) of the speech transmission index STI values for the acoustic treatment variant no. 5 (sound-absorbing suspended ceiling, sound-absorbing lining, sound-absorbing material on the walls, sound screens, desks and seats, and low-frequency acoustic background 27.1 dB) by ODEON [23]

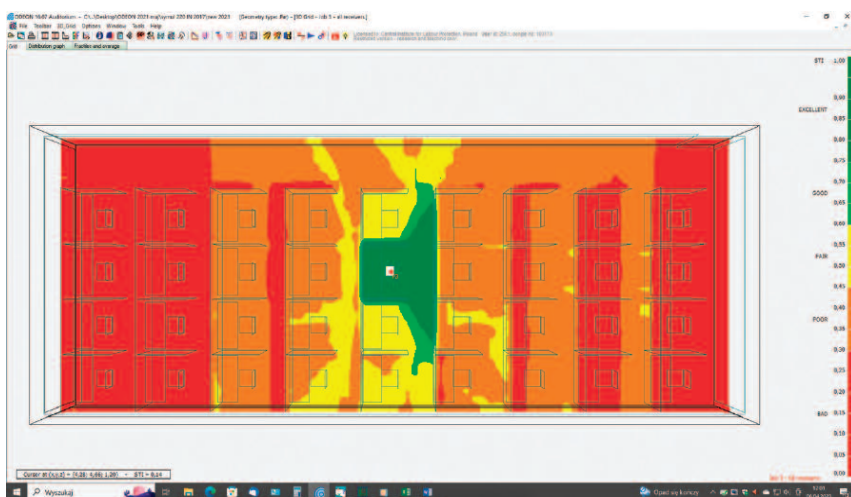
umieszczonego w środku pomieszczenia. W przypadku tego wariantu adaptacji akustycznej uzyskano także spełnienie warunku na poziom dźwięku na wszystkich sąsiednich stanowiskach pracy (rysunek 2a i 2b). Był on mniejszy niż 41,9 dB (maksymalny wymagany 51,4 dB, wartość kryterialna obliczona z poziomu dźwięku A w odległości 1 m od wzorcowego źródła mowy równego 57,4 dB wg PN-EN ISO 3382-3 [7] i różnicy poziomów między stanowiskami pracy $D_{A,S}$ równego 6 dB wg ISO 22955 [8]; tabela 3). Spełnione jest również kryterium na dystans komfortu r_C wg PN-EN ISO 3382-3 [7]. Obliczony, to 1,19 m, a maksymalny dopuszczalny 5 m. W związku z tym, że minimalna odległość między stanowiskami pracy wynosi 1,6 m, za taki należałoby przyjąć dystans komfortu. Do spełnionych należy także kryterium na duże zmniejszenie zrozumiałości mowy w funkcji odległości. Promień rozproszenia r_p wynosi 2,99 m, a wg PN-EN ISO 3382-3 [7] maksymalny dopuszczalny to 5 m (tabela 3 i rysunek 3). Natomiast niespełnionym kryterium jest przenikanie dźwięku (a przede wszystkim zrozumiałej mowy) między sąsiednimi stanowiskami pracy. Dalsza adaptacja akustyczna pomieszczenia pasywnymi elementami/wyrobami dźwiękochłonnymi, np. przez zwiększenie

wysokości ekranów akustycznych, nie wpłynie na poprawę tego efektu ze względu na małą odległość między stanowiskami pracy. Konieczne jest zastosowanie radykalnego rozwiązania technicznego polegającego na niewielkim zwiększeniu tła akustycznego, przez zastosowanie dźwięków maskujących. Jest to akceptowalne wg ISO 22955 [8] i PN-EN ISO 3382-3 [7]. W wariantach

adaptacji akustycznej 0 – 5 nie uwzględniono dźwięku maskującego, a przyjęty poziom dźwięku A niskoczęstotliwościowego tła akustycznego wyniósł 27,1 dB (tabela 2).

Wariant 6 adaptacji akustycznej pomieszczenia. Dodatkowe (poza dźwiękochłonnym sufitem podwieszanym, biurkami i siedziskami, dźwiękochłonną wykładziną podłogową, materiałami dźwiękochłonnymi na ścianach oraz ekranami akustycznymi) zastosowanie dźwięku maskującego, dającego poziom dźwięku A 32 dB (tabela 2), pozwala spełnić ostatnie kryterium, tj. maksymalny wskaźnik transmisji mowy na wszystkich sąsiadujących stanowiskach pracy STI_{near} jest mniejszy od 0,57 (maksymalna wartość kryterialna 0,59, tj. poniżej zrozumiałości mowy tzw. dobrej wg PN-EN 60268-16 [21] tabela 3). Na rysunku 4 pokazano rozkład wskaźnika transmisji mowy STI na płaszczyźnie poziomej, ilustrujący zasięg zrozumiałości mowy od wzorcowego źródła umieszczonego w środku pomieszczenia. Wynika z tego, że wariant 6 spełnia wszystkie zalecane wymagania.

Wariant 6' adaptacji akustycznej pomieszczenia. Zgodnie z ISO 22955 [8] oraz przyjętymi przeze mnie warto-



Rys. 4. Rozkład na płaszczyźnie poziomej ($h = 1,2$ m) wartości wskaźnika transmisji mowy STI dla wariantu adaptacji akustycznej nr 6 (dźwiękochłonny sufit podwieszany, wykładzina dźwiękochłonna, materiał dźwiękochłonny na ścianach, ekrany akustyczne, biurka i siedziska oraz tło akustyczne razem z dźwiękiem maskującym 32,0 dB) wg ODEON [23]

Fig. 4. Distribution on the horizontal plane ($h = 1.2$ m) of the speech transmission index STI values for the acoustic treatment variant no. 6 (sound-absorbing suspended ceiling, sound-absorbing lining, sound-absorbing material on the walls, sound screens, desks and seats, and low-frequency acoustic background with masking sound 32,0 dB) by ODEON [23]

ściami [13], poziom dźwięku A tła akustycznego omawianego pomieszczenia nie powinien być większy niż 35 – 40 dB. PN-EN ISO 3382-3 [7] zaleca, aby poziom ciśnienia akustycznego w zakresie częstotliwości 125 – 8000 Hz wynosił 35 – 45 dB. Nie podważam tego zalecenia, ale moim zdaniem, jeżeli uzyska się spełnienie wszystkich kryteriów przy zastosowaniu dźwięku maskującego o niższym poziomie dźwięku, to takie rozwiązanie należy uznać za bardziej właściwe, gdyż pracownicy będą dodatkowo pracowali w środowisku o mniejszym poziomie hałasu. W obliczeniach (wariant 6' adaptacji akustycznej) uwzględniono więc wypadkowy poziom dźwięku A tła akustycznego i dźwięku maskującego 37 dB (w przypadku rozpatrywanego widma poziom ciśnienia akustycznego w zakresie częstotliwości 125 – 8000 Hz wynosi 40 dB).

Wnioski

Przeprowadzone wielowariantowe badania obliczeniowe wykazały, że w rozpatrywanym pomieszczeniu biurowym open space w celu uzyskania spełnienia wymagań akustycznych, tj. wg PN-B-02151-4:2015 [6], PN-EN ISO 3382-3:2022 [7], PN-B-02151-2:2018 [5] oraz ISO 22955:2021 [8], konieczne jest zastosowanie: adaptacji akustycznej pomieszczenia i stanowisk pracy (w tym dźwiękochłonnego sufitu podwieszanego, wykładziny dźwiękochłonnej na podłodze, materiałów dźwiękochłonnych na ścianach bocznych i ekranów akustycznych itp.) oraz maskowania dźwięków mowy. Dźwięk maskujący musi mieć odpowiedni poziom oraz odpowiednie widmo częstotliwościowe. W przypadku dźwięku maskującego, którego widmo jest szumem różowym, minimalna wartość poziomu dźwięku A łącznie z zastaniem niskoczęstotliwościowym tłem akustycznym, np. tła ok. 27,1 dB, wynosił 32 dB. Wartość ta w przypadku szumu różowego jest o ok. 5 dB mniejsza niż zalecana wg PN-EN ISO 3382-3:2022 [7]. Wyniki potwierdziły także wstępne spostrzeżenie, że wymagania akustyczne określone w PN-B-02151-4:2015 [6] można spełnić, stosując znacznie mniejszą liczbę i o słabszych właściwościach

dźwiękochłonnych technicznych środków adaptacji akustycznej pomieszczeń niż w przypadku wymagań wg ISO 22955:2021 [8] i PN-EN ISO 3382-3:2022 [7]. W nowej wersji normy PN-EN ISO 3382-3 [7] z 2022 r. znacznie zwiększono wymagania akustyczne dotyczące spadku poziomu dźwięku w funkcji odległości w porównaniu z wersją z 2012 r. Mimo że różnica wartości kryterialnych to tylko 1 dB (z 7 zwiększono do 8 dB), to spełnienie zaostrzonego kryterium będzie wymagało znacznie większej adaptacji akustycznej (w rozpatrywanym przypadku wymaga zwiększenia wysokości ekranów akustycznych o ok. 20 cm).

Literatura

- [1] Pierrette M, Parizet E, Chevret P, Chatillon J. Noise effect on comfort in Open space offices: development of an assessment questionnaire. *Ergonomics*. 2015; <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00140139.2014.961972> [cytowany 1.02.2023].
- [2] Nurzyński J. Warunki akustyczne w wielkoprzestrzennych pomieszczeniach biurowych. *Materiały Budowlane*. 2018; DOI: 10.15199/33.2018.08.02.
- [3] Mikulski W. Warunki akustyczne w pomieszczeniach biurowych open space – zastosowanie środków technicznych w typowym pomieszczeniu. *Med Pr*. 2018; <https://doi.org/10.13075/mp.5893.00574>.
- [4] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie. *Dz.U.* z 2022r., poz. 1225.
- [5] PN-B-02151-2: 2018 Akustyka budowlana – Ochrona przed hałasem w budynkach – Część 2: Wymagania dotyczące dopuszczalnego poziomu dźwięku w pomieszczeniach.
- [6] PN-B-02151-4:2015 Akustyka budowlana. Ochrona przed hałasem w budynkach. Część 4: Wymagania dotyczące warunków pogłosowych i zrozumiałości mowy w pomieszczeniach.
- [7] PN-EN ISO 3382-3:2022 Akustyka. Pomiar parametrów akustycznych pomieszczeń. Część 3: Pomieszczenia biurowe typu „open space”.
- [8] ISO 22955:2021 Acoustics – Acoustic quality of open office spaces.
- [9] Acun V, Yilmaz S. A grounded theory approach to investigate the perceived sound scape of open-plan offices. *Applied Acoustics*. 2018; <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0003682X16305850?token=8A1A8081319CC103190693E4D5A6849A-AFA9AE66FA1498A8FC237510307521E-3D40CDFF608047541C3FA17ACF-F27304D&originRegion=eu-west-1&originCreation=20230131100412> [cytowany 1.02.2023].
- [10] Haapakangas A, Hongisto V. Distraction distance and perceived disturbance by noise – An analysis of 21 open-plan offices. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2017; <https://doi.org/10.1121/1.4973690> [cytowany 1.02.2023].

[11] Zaglauer M, Drotleff H., Liebl A. Background babble in open-plan offices: A natural masker of disruptive speech?. *Appl ACOUST*. 2017; 118: 1-7. Doi: 10.1016/J.APACoust. 2016.11.004.

[12] Haapakangas A, Hongisto V. Distraction distance and perceived disturbance by noise – An analysis of 21 open-plan offices. *Journal of the Acoustical Society of America* 2017; <https://doi.org/10.1121/1.4973690>.

[13] Mikulski W. Wpływ dźwięku maskującego zrozumiałość mowy na środowisko akustyczne w biurach typu open space – wyniki badań własnych. *Bezpiecz. Pr. Nauka Prakt.* 2020; <https://doi.org/10.5604/01.3001.0014.5757>.

[14] Mikulski W. Zmniejszenie uciążliwości hałasu w biurowych pomieszczeniach open space przez maskowanie dźwięków niepożądanych kolumnami dźwiękowymi w kształcie piramid. *Med Pr*. 2022; DOI: <https://doi.org/10.13075/mp.5893.01244>.

[15] Nowicka E. Ocena właściwości akustycznych pomieszczeń typu open space. *Materiały Budowlane*. 2018; DOI: 10.15199/33.2018.08.03.

[16] Kłosak A. K. Praktyczne aspekty stosowania PN-B-02151-4:2015 w projektowaniu pomieszczeń do komunikacji słownej. *Materiały Budowlane*. 2016; DOI: 10.15199/33.2016.08.10.

[17] Kłosak A. K. Wytyczne do projektowania pomieszczeń zgodnie z nową normą o akustyce wewnątrz – PN-B-02151-4: 2015-06. *Materiały Budowlane*. 2017; DOI: 10.15199/33.2017.08.43.

[18] Szudrowicz B, Niemas M. Wpływ sufitów podwieszonych na kształtowanie warunków akustycznych w pomieszczeniach. *Materiały Budowlane*. 2006; 3: 51 – 55.

[19] Wenmaekers RHC, Van Hout N. How ISO 3382-3 Acoustic Parameter Values are affected by Furniture, Barriers and Sound Absorption in a Typical Open Plan Office. *Proceedings of the ICA 2019 Aachen (Germany)*, 2019; <http://pub.dega-akustik.de/ICA2019/data/articles/000661.pdf> [cytowany 1.02.2023].

[20] Mikulski W. Ocena jakości akustycznej pomieszczeń biurowych typu open space z uwzględnieniem normy ISO 22955:2021. *Bezpiecz. Pr. Nauka Prakt.* 2022; DOI: 10.54215/BP.2022.12.32.

[21] PN-EN 60268-16:2021 Urządzenia systemów elektroakustycznych – Część 16: Obiektywna ocena zrozumiałości mowy za pomocą wskaźnika transmisji mowy.

[22] PN-B-02151-3:2015 Izolacyjność akustyczna.

[23] ODEON Room Acoustics Software. <https://odeon.dk/product/what-is-odeon/> [cytowany 1.02.2023].

Podziękowanie

Opracowano na podstawie wyników V etapu programu wieloletniego „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy”, finansowanego w zakresie zadań służb państwowych ze środków Ministerstwa Rodziny i Polityki Społecznej. (Zadanie nr 2.SP.05 pt. Opracowanie źródła dźwięku maskującego hałas związany z komunikacją werbalną w biurowych pomieszczeniach wielkoprzestrzennych. Główny wykonawca dr hab. inż. Witold Mikulski, prof. CIOP-PIB). Koordynator Programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy.

Przyjęto do druku: 26.05.2023 r.