

dr inż. Witold Mikulski¹⁾

Projektowanie adaptacji akustycznej otwartych pomieszczeń do prac administracyjnych. Część 2. Projektowanie dodatkowe

Acoustic treatment of open plan offices. Part 2. Additional design

DOI: 10.15199/33.2019.09.07

Streszczenie. Projektowanie akustyczne otwartych pomieszczeń do prac administracyjnych (tzw. biurowych open space) można podzielić na dwa etapy. Etap pierwszy, obligatoryjny (podstawowy) wymagany przez przepisy, zakłada uzyskanie w pomieszczeniu wymaganych warunków pogłosowych (odpowiednio dużej chłonności akustycznej; omówiony został w artykule autora w „Materiałach Budowlanych” nr 8/2019). Etap drugi (dodatkowy) polega na takiej aranżacji pomieszczeń i stanowisk pracy oraz uwzględnieniu w pomieszczeniu różnych dodatkowych wyrobów dźwiękochłonnych, np. ekranów akustycznych, aby uzyskać w nim wymagane warunki propagacji (a właściwie separacji) dźwięków mowy między stanowiskami pracy. W ramach projektowania dodatkowego podano wyniki obliczeń metodą wg PN-EN ISO 3382-3:2012 siedmiu wariantów adaptacji akustycznej pomieszczenia.

Słowa kluczowe: akustyka pomieszczeń; czas pogłosu; chłonność akustyczna; STI.

Abstract. Acoustic design of open plan office can be divided into two stages. The first stage, obligatory by Polish regulations, is to obtain the room's required sound absorption. It was discussed in the author's article in "Building Materials" No. 8/2019. The second (additional) stage consists in such arrangement of rooms and work stations and taking into account various additional sound-absorbing products, e.g. acoustic screens, in order to obtain the required conditions for the propagation (or actually separation) of speech sounds between workplaces. As part of the additional design, results of calculations according to the EN ISO 3382-3:2012 method of seven variants of the room's acoustic treatment are given.

Keywords: room acoustics; reverberation time; sound absorption; STI.

Kryteria oceny akustycznej otwartych pomieszczeń do pracy administracyjnej można podzielić na: obligatoryjne (podstawowe) wg PN-B-02151-4:2015 [5] oraz zalecane przez PN-EN ISO 3382-3:2012 (dodatkowe) [6]. Etap podstawowego projektowania akustycznego opisano w pierwszej części artykułu („Materiały Budowlane” nr 8/2019 str. 16 – 20) [3].

Projektowanie dodatkowe obejmuje uwzględnienie w projekcie takiej aranżacji stanowisk pracy oraz takich elementów kształtujących właściwości akustyczne pomieszczenia, aby finalnie uzyskać zadane właściwości propagacji dźwięków mowy i zrozumiałości mowy w pomieszczeniu między stanowiskami pracy. Właściwości te określone są pośrednio [2, 4]: promieniem rozproszenia r_p (określanym ze wskaźnika transmisji mowy STI) oraz poziomem dźwięku A mowy w odległości 4 m od mówiącego $L_{p,A,S,4m}$ i spadkiem poziomu dźwięku A mowy na podwojenie odległości od źró-

dła $D_{2,5}$ (określanymi z poziomu dźwięku A mowy). Metody ich określania oraz zalecane wartości tzw. dobrych właściwości akustycznych podane są w normie PN-EN ISO 3382-3:2012 [6].

Projektowanie właściwości akustycznych pomieszczenia wg PN-EN ISO 3382-3:2012

Etap projektowania dodatkowego właściwości akustycznych pomieszczenia wg PN-EN ISO 3382-3:2012 [6] zrealizowano z wykorzystaniem do obliczeń programu ODEON [8]. Program ten umożliwia także obliczenie czasu pogłosu pomieszczenia. Następnie, ze wzoru Sabina, można obliczyć chłonność akustyczną ze znacznie większą dokładnością niż w metodzie podanej w normie PN-B-02151-4:2015 [5], stosowanej do projektowania podstawowego.

W przypadku wykonywania projektów wielowariantowych [1, 2] oraz porównywania wyników obliczeń chłonności akustycznej pomieszczenia metodami wg PN-B-02151-4:2015 i symulacyjnymi (np. ODEON) wygodniej jest zamiast chłonności akustycznej po-

mieszczenia stosować chłonność akustyczną pomieszczenia odniesioną do metra kwadratowego rzutu pomieszczenia (na ogół podłogi). Wówczas wartość kryterialna tej ostatniej wielkości wynosi 1,1 m².

Przykład dodatkowego projektowania akustycznego pomieszczenia

Wyniki obliczeń projektowania dodatkowego podano na przykładzie wybranego pomieszczenia – rysunek 1 (jak w części 1 artykułu). Wymiary pomieszczenia 22 x 10 x 3,5 m, objętość pomieszczenia 770 m³, pole powierzchni całkowitej pomieszczenia $S_v = 630$ m², pole powierzchni rzutu pomieszczenia $S_p = 220$ m². Wymagana minimalna chłonność akustyczna rozpatrywanego pomieszczenia, w paśmie częstotliwości 500 – 2000 Hz, wynosi:

$$A_{\min} = S_p \cdot 1,1 = 242 \text{ m}^2 \quad (1)$$

gdzie:

S_p – pole powierzchni rzutu pomieszczenia [m²];
1,1 – wartość minimalnej chłonności akustycznej pomieszczenia otwartego do prac administracyjnych odniesionej do 1 m² rzutu pomieszczenia podana w PN-B-02151-4:2015 [m²].

¹⁾ Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy; wimik@ciop.pl

Maksymalny czas pogłosu pomieszczenia, w paśmie częstotliwości 500 – 2000 Hz, wynosi:

$$T = 0,161 (V/A) = 0,51 \text{ s} \quad (2)$$

gdzie:

V – kubatura pomieszczenia [m³];

A – chłonność akustyczna pomieszczenia [m²].

W projektowaniu uwzględniono 7 wariantów adaptacji akustycznych pomieszczenia:

1) pomieszczenie bez materiałów dźwiękochłonnych na ścianach i suficie oraz bez ekranów akustycznych;

2) pomieszczenie z sufitem dźwiękochłonnym (materiałami dźwiękochłonnymi na suficie);

3) pomieszczenie z sufitem dźwiękochłonnym i materiałami dźwiękochłonnymi na ścianach długich (dwóch; rysunek 1; wariant ten jest identyczny z wariantem „3” opisanym w części 1 artykułu);

4) pomieszczenie z sufitem dźwiękochłonnym i materiałami dźwiękochłonnymi na czterech ścianach;

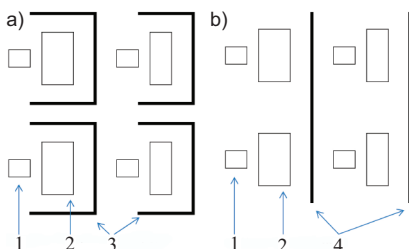
5) pomieszczenie z sufitem dźwiękochłonnym i materiałami dźwiękochłonnymi na czterech ścianach oraz z jedenastoma ekranami akustycznymi długimi (rysunek 2) o wysokości od podłoża 1,7 m;

6) pomieszczenie z sufitem dźwiękochłonnym i materiałami dźwiękochłonnymi na czterech ścianach oraz 55 ekranami stanowiskowymi (rysunek 2) o wysokości od podłoża 1,5 m;

7) pomieszczenie z sufitem dźwiękochłonnym i materiałami dźwiękochłonnymi na czterech ścianach oraz 55 ekranami stanowiskowymi (rysunek 2) o wy-

sokości od podłoża 1,7 m (wariant identyczny z wariantem „7” opisanym w części 1 artykułu).

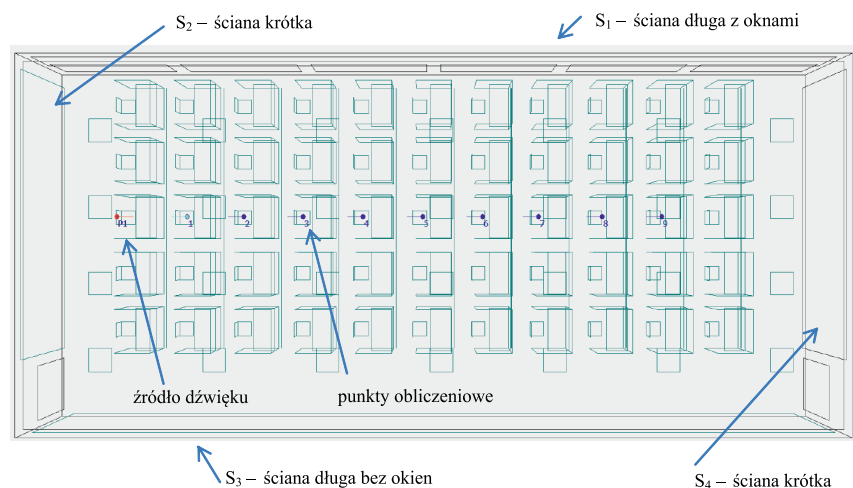
We wszystkich wariantach adaptacji akustycznej przyjęto pokrycie podłogi wy-



1 – siedzisko; 2 – biurko; 3 – ekran stanowiskowy; 4 – ekran długi

Rys. 2. Widok ekranów akustycznych na fragmencie rzutu pomieszczenia: a) stanowiskowych; b) długich (między rzędami stanowisk)

Fig. 2. View of acoustic screens on the projection of the room: a) around workstation b) long (between rows of workstation)



Rys. 1. Rzut rozpatrywanego pomieszczenia (wygenerowany w programie ODEON)
Fig. 1. View of the considered room (generated in the ODEON software)

kładziną dywanową o ważonym współczynniku pochłaniania dźwięku $\alpha_w = 0,25$.

Na podstawie wyników obliczeń wg metody PN-B-02151-4:2015 [5], w etapie projektowania podstawowego podanych w części 1 artykułu [3], stwierdzono, że oszacowana obliczeniowo chłonność akustyczna pomieszczenia (warianty adaptacji akustycznej 3 i 7) jest wystarczająca (spełnia wymagania normy PN-B-02151-4:2015). W związku z tym, że w etapie projektowania dodatkowego obliczenia wykonuje się metodą o znacznie większej dokładności, zamiast stosować kryterium chłonności akustycznej, zastosowano kryterium czasu pogłosu.

Przy określaniu wskaźnika transmisji mowy STI (a więc i promienia rozproszenia r_D) konieczne jest przyjęcie widma tła akustycznego. W obliczeniach przyjęto wartość poziomu dźwięku A tła akustycznego równą wartości dopuszczalnej tła akustycznego wg normy PN-B-02151-2:1987 [7] w przypadku pomieszczeń *do pracy umysłowej wymagającej silnej koncentracji uwagi*, która wynosi 35 dB. Widmo dźwięku przyjęto wg standardowego widma tła akustycznego o tym poziomie dźwięku A podanego w programie ODEON (tabela 1). W tabeli 2 podano wyniki obliczeń, metodą symulacji pola akustycznego w programie ODEON, w przypadku różnych wariantów adaptacji akustycznej pomieszczenia. Wyniki obliczeń wariantu 3 metodą symulacji pola akustycznego wykazały, że wymagania określone czasem pogłosu wg normy PN-B-02151-4:2015 i chłonnością akustyczną pomieszczenia odniesioną do 1 m² powierzchni rzutu pomieszczenia nie są spełnione przy częstotliwości 500, 1000 i 2000 Hz i wynoszą odpowiednio: 1,01; 0,99 i 1,04 m², a wymagana 1,1 m² (na podstawie obliczeń wg PN-B-02151-2:1987 podano, że są spełnione). Wariant 4 już spełnia te wymagania. Natomiast **spełnienie zaleceń dotyczących dobrej akustyki, wg normy PN-EN ISO 3382-3:2012, ma miejsce dopiero w przypadku adaptacji akustycznej wariantu 7: promień rozproszenia r_D 3,3 m (maksymalny zalecany 5 m); poziom dźwięku A mowy w odległości 4 m od źródła $L_{p,A,S,4m}$ 38,2 dB (maksymalny zalecany 48 dB) i spadek poziomu dźwięku A mowy na podwojenie odległości od źródła $D_{2,S}$ 7 m (minimalny zalecany 7 m).**

Tabela 1. Poziom ciśnienia akustycznego przyjętego do obliczeń w programie ODEON wg standardowego widma tła akustycznego o tym poziomie dźwięku A podanego w [7]
Table 1. Sound pressure level adopted for calculations in the ODEON program according to standard acoustic background spectrum about this A-weighted sound pressure level given in [7]

Poziom ciśnienia akustycznego [dB] przy częstotliwości [Hz]							Poziom dźwięku A [dB]	
63	125	250	500	1000	2000	4000		8000
53,4	43,4	36,4	30,4	26,4	23,4	21,4	20,4	35,0

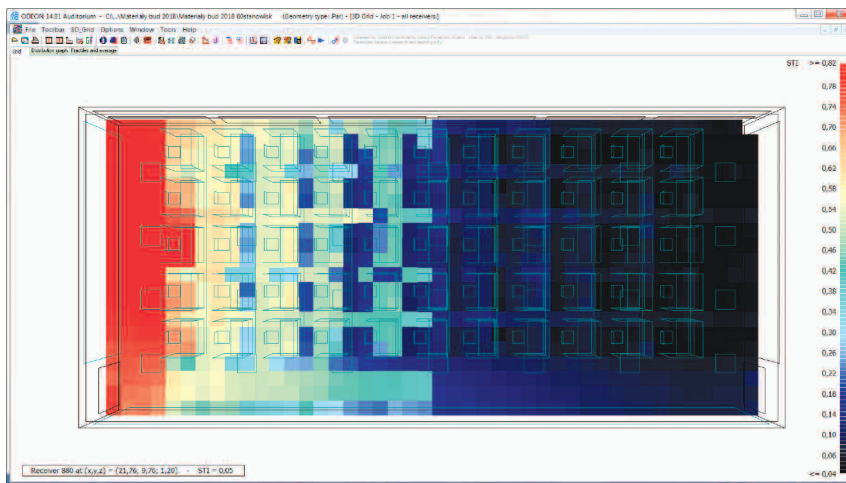
Tabela 2. Wyniki obliczeń w przypadku różnych wariantów adaptacji akustycznej projektu pomieszczenia ($L_{A_{ta}} = 35$ dB)
 Table 2. Calculation results for different variants of the acoustic treatment of the room design ($SPLA = 35$ dB)

Nr wariantu	Materiał dźwiękochłonny			Ekran-y długie – wysokość [m]	Ekran- stanowisko- wy wysokość [m]	Czas pogłosu w sekundach, dla częstotliwości [Hz]:											Chłonność akus- tyczna pomiesz- czenia odniesiona do 1 m ² powierzchni rzutu pomiesz- czenia [m ²], dla częstotli- wości [Hz]:			Wyma- gania obligatory- rne (podsta- wowe) wg PN-B-02151-4:2015	$L_{p,A,S,4m}$ [dB]	$D_{2,S}$ [dB]	r_D [m]	Zalecenia nieobliga- toryjne (dodat- kowe) wg PN-EN ISO 3382-3:2012	
	sufit	ściany długie	ściany krót- kie			63	125	250	500			1000			2000			500	1000						2000
									≤0,51	≤0,51	≤0,51	–	–	–	–	–	–								
1	–	–	–	–	–	1,92	1,85	1,74	1,23	1,09	0,99	0,84	0,59	0,46	0,52	0,57	niespeł- nione	54,6	1,8	11,8	niespeł- nione				
2	+	–	–	–	–	1,71	1,49	1,1	1,03	1	0,92	0,79	0,53	0,55	0,56	0,61	niespeł- nione	51,7	2,7	14,7					
3	+	+	–	–	–	1,58	1,21	0,63	0,56	0,57	0,54	0,49	0,37	1,01	0,99	1,04	niespeł- nione	49,9	3,8	15,6					
4	+	+	+	–	–	1,51	1,11	0,44	0,23	0,23	0,23	0,26	0,23	2,45	2,45	2,45	spełnione	48,5	4,6	14,3					
5	+	+	+	1,7	–	1,48	1,1	0,38	0,24	0,21	0,24	0,23	0,21	2,35	2,68	2,35	spełnione	38,6	6,6	3,1					
6	+	+	+	–	1,5	1,52	1,12	0,34	0,18	0,2	0,19	0,2	0,18	3,13	2,82	2,97	spełnione	39,5	5,8	4,5					
7	+	+	+	–	1,7	1,5	1,07	0,33	0,2	0,21	0,22	0,18	0,17	2,82	2,68	2,56	spełnione	38,2	7,0	3,3					

$L_{p,A,S,4m}$ – poziom dźwięku A mowy w odległości 4 m od źródła [dB]; $D_{2,S}$ – spadek poziomu dźwięku A mowy na podwojenie odległości od źródła [dB]; r_D – promień rozproszenia, w metrach. Tło czerwone oznacza niespełnienie wymagań, tło zielone spełnienie wymagań, tło żółte niespełnienie wymagań, jednakże wartości bliskie kryterialnym

Na rysunkach 3 – 4 pokazano wyniki obliczeń metodą symulacji pola akustycznego dla wariantu nr 7 (pokrycie sufitu, ścian długich i krótkich materia- lem dźwiękochłonnym oraz ekranów stanowiskowych o wysokości 1,7 m). Na podstawie rysunków 3 i 4 oraz danych z tabeli 2 stwierdzono, że w przypadku wariantów adaptacji akustycznej 5 i 7 ekrany stanowiskowe są bardziej efektywne niż ekrany między rzędami pomiesz- czeń, tzw. ekrany długie (rysunek 2).

W tabeli 3 zestawiono wyniki obli- czeń chłonności akustycznej odniesio- nej do 1 m² powierzchni rzutu pomiesz- czenia dla wariantów 3 i 7 adaptacji aku- stycznej pomiesz- czenia: metodą wg PN-B-02151-4:2015 (część 1 artykułu [3]) i metodą symulacji pola akustycznego w pomieszczeniu (programem ODEON). Jak można zauważyć, wyniki obliczeń nie są identyczne. Rozbieżności w przy- padku wariantu 3 adaptacji akustycznej przy częstotliwości 500, 1000 i 2000 Hz wynoszą odpowiednio 36%, 65% i 50%, natomiast dla wariantu 7 (o większej ada- ptacji akustycznej) 10%, 19% i 17%. Jed- ną z przyczyn jest to, że chłonność aku- styczną określa się metodami obliczenio- wymi ze wzoru Sabina na podstawie czasu pogłosu, który w rozpatrywanych wnętrzach (pole akustyczne zbliżone do swobodnego) wykazuje dużą nierów- nomierność. Skutkiem nierównomierno- go rozmieszczenia elementów dźwięko- chłonnych są niejednakowe warunki śro- dowiska akustycznego w tych pomiesz-



Rys. 3. Rozkład w przekroju poziomym pomieszczenia (h = 1,2 m) wskaźnika transmisji mowy STI (ekrany stanowiskowe), dla wariantu 7 adaptacji akustycznej (rys. wygenero- wany przez program ODEON)

Fig. 3. Spatial distribution (in the horizontal section of the room h = 1.2 m) of the STI sound transmission index (around workstation screens), for variant No. 7 of acoustic treatment (generated in the ODEON software)

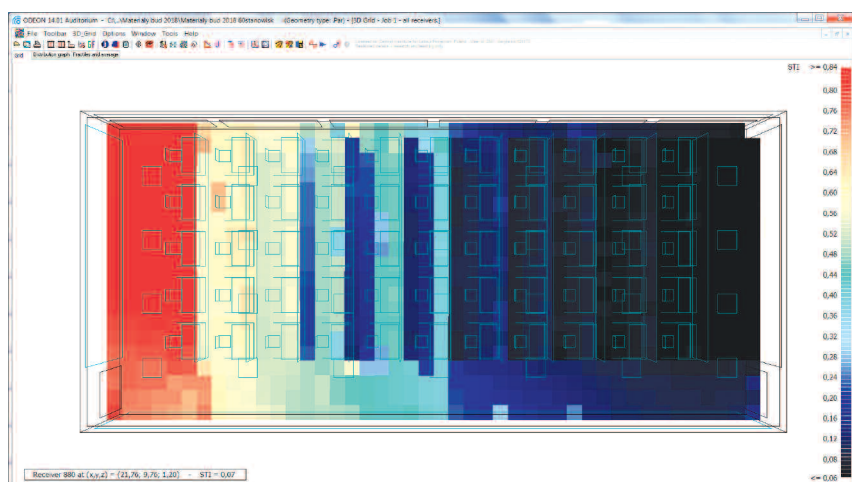
zeniach. Statystyczne metody obliczenio- we (m.in. podana w PN-B-02151-4:2015) mają mniejszą dokładność niż metody symulacyjne.

Wnioski

W celu uzyskania odpowiednich war- runków akustycznych w pomiesz- czeniach otwartych do prac administracyj- nych (wg wymagań podstawowych, po- danych w obligatoryjnej polskiej nor- mie PN-B-02151-4:2015), konieczne jest uwzględnienie dużej chłonności akustycznej pomiesz- czenia, co wiąże się z zastosowaniem materiałów dźwięko- chłonnych na suficie, ścianach i podło-

dze pomiesz- czenia. Działania te powin- ny doprowadzić do uzyskania chłonno- ści akustycznej pomiesz- czenia odnie- sionej do 1 m² rzutu pomiesz- czenia rów- nej lub większej od 1,1 m² w paśmie częstotliwości 500 – 2000 Hz. W związ- ku z tym, że jest to wymaganie obliga- toryjne, określone przepisami, wymie- nione wcześniej materiały powinny być zastosowane przed oddaniem budynku do eksploatacji.

Spełnienie wymagań dotyczących dobrych właściwości akustycznych po- miesz- czenia wg PN-EN ISO 33823:2012 (poziomu dźwięku A mowy w odległo- ści 4 m od źródła $L_{p,A,S,4m} \leq 48$ dB i spad-



Rys. 4. Rozkład w przekroju poziomym pomieszczenia ($h = 1,2$ m) wskaźnika transmisji mowy STI (ekrany długie), dla wariantu nr 5 adaptacji akustycznej (rys. wygenerowany przez program ODEON)

Fig. 4. Spatial distribution (in the horizontal section of the room $h = 1.2$ m) of the STI sound transmission index (long screens), for variant No. 5 of acoustic treatment (generated in the ODEON software)

Tabela 3. Wyniki obliczeń chłonności akustycznej odniesionej do 1 m^2 podłogi dla wariantów 3 i 7 adaptacji akustycznej pomieszczenia: metodą wg PN-B-02151-4:2015 [5] i metodą symulacji komputerowej pola akustycznego
Table 3. The results of the calculation of the sound absorption related to 1 m^2 of floor for variants No 3 and 7 of the room's acoustic treatment: by the method of PN-B-02151-4:2015 [5] and by the method of computer simulation of the sound field

Wariant adaptacji akustycznej	Materiał dźwiękochłonny na suficie i ścianach długich oraz	Ekran stanowiskowy – wysokość	Chłonność akustyczna pomieszczenia odniesiona do 1 m^2 powierzchni rzutu pomieszczenia [m^2], przy częstotliwości:					
			500 Hz		1000 Hz		2000 Hz	
			wg PN-B-02151-4	wg symulacji komputerowej	wg PN-B-02151-4	wg symulacji komputerowej	wg PN-B-02151-4	wg symulacji komputerowej
3	–	–	1,37	1,01	1,62	0,99	1,57	1,04
7	ścianach krótkich	1,7 m	2,54	2,82	3,19	2,68	3,0	2,56

ku poziomemu dźwięku A mowy na podwojenie odległości od źródła $D_{2,s} \geq 7$ dB oraz promienia rozproszenia $r_D \leq 5$ m) wymaga dodatkowego uwzględnienia odpowiedniej aranżacji stanowisk pracy oraz zastosowania wysokich ekranów akustycznych (o wysokości ok. 1,7 m), pokrytych materiałami dźwiękochłonnymi o dużej lub średniej wartości ważonego współczynnika pochłaniania dźwięku $\alpha_w \geq 0,5$. Działania te powinny doprowadzić do uzyskania czasu pogłosu pomieszczenia znacznie mniejszego niż wymagany ok. 0,5 s (w praktyce ok. dwukrotnie mniejszego, tj. ok. 0,25 s), co jest równoznaczne z uzyskaniem dwukrotnie większej chłonności akustycznej.

Wyniki analizy obliczeniowej wg metody symulacji pola akustycznego wykazały, że gdy spadek poziomu dźwięku A mowy na podwojenie odległości od źródła $D_{2,s}$ spełnia kryterium, to poziom dźwięku A mowy w odległości 4 m $L_{p,A,S,4m}$ również spełnia kryterium. Następnie konieczne jest zapewnienie do-

statecznie szybko malejącej zrozumiałości mowy (chodzi o to, aby rozmowy pracowników nie przeszkadzały w pracy innym pracownikom). Zasięg zrozumiałości mowy określony odległością od źródła mowy, w której wartość wskaźnika transmisji mowy STI jest równa 0,5, nie powinien przekraczać 5 m (tj. promień rozproszenia $r_D \leq 5$ m). Można to uzyskać (przy stałym poziomie dźwięku A tła akustycznego) przez zwiększenie ekranowania dźwięku oraz w pewnym niewielkim stopniu przez zwiększenie chłonności akustycznej pomieszczenia.

Z porównania wartości chłonności akustycznej pomieszczenia obliczonej metodą wg PN-B-02151-4:2015 i metodą symulacji pola akustycznego w pomieszczeniu wynika, że nie są one w pełni zgodne. Nie znaczy to, że statystyczne metody obliczeniowe (m.in. związane z chłonnością akustyczną wyznaczoną metodą podaną w PN-B-02151-4:2015) są mniej przydatne. Mają one mniejszą dokładność, ale przez to, że są proste i ta-

nie, dobrze nadają się do powszechnego wykorzystania przy projektowaniu wstępnym adaptacji akustycznej, tj. na etapie projektowania podstawowego.

Literatura

- [1] Kłosak Andrzej K. 2017. „Wytyczne do projektowania pomieszczeń zgodnie z nową normą o akustyce wnętrz – PN-B-02151-4:2015-06”. *Materiały Budowlane* 540 (8): 143 – 146. DOI: 10.15199/33.2017.08.43.
- [2] Mikulski Witold. 2019. „Badania obliczeniowe zrozumiałości mowy w pomieszczeniach biurowych open space”. *Medycyna Pracy* 70 (3): 327 – 342. DOI: <https://doi.org/10.13075/mp.5893.00726>.
- [3] Mikulski Witold. 2019. „Projektowanie adaptacji akustycznej otwartych pomieszczeń do prac administracyjnych. Część 1 – projektowanie podstawowe adaptacji akustycznej pomieszczenia z wykorzystaniem obliczeń wg PN-B-02151-4:2015”. *Materiały Budowlane* 564 (8): 16 – 20. DOI: 10.15199/33.2019.08.
- [4] Nurzyński Jacek. 2018. „Warunki akustyczne w wielkoprzestrzennych pomieszczeniach biu-

rowych”. *Materiały Budowlane* 552 (8): 10 – 12. DOI: 10.15199/33.2018.08.02.

[5] PN-B-02151-4:2015 Akustyka budowlana Ochrona przed hałasem w budynkach – Część 4: Wymagania dotyczące warunków pogłosowych i zrozumiałości mowy w pomieszczeniach (podana w wykazie polskich norm powołanych w Rozporządzeniu Ministra Infrastruktury i Budownictwa z 14 listopada 2017r. (Lp. 60a, paragraf 323 ust. 2.). Dz.U. 2017 r. poz. 2285.

[6] PN-EN ISO 3382-3:2012 Akustyka – Pomiar parametrów akustycznych pomieszczeń – Część 3: Pomieszczenia biurowe typu open space.

[7] PN-B-02151-02:1987. Akustyka budowlana. Ochrona przed hałasem pomieszczeń w budynkach. Dopuszczalne wartości poziomu dźwięku w pomieszczeniach. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa (nowsza wersja jeszcze nieobowiązująca PN-B-02151-2:1987).

[8] Program ODEON, <https://odeon.dk/>.

Artykuł opracowano na podstawie wyników IV etapu programu „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy”, finansowanego w latach 2017 – 2019 przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego/Narodowe Centrum Badań i Rozwoju. Koordynator programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy.

Przyjęto do druku: 24.07.2019 r.