

Wytyczne techniczne modyfikacji akustycznej pomieszczeń, w których na stanowiskach pracy konieczne jest zapewnienie warunków akustycznych do pracy wymagającej koncentracji uwagi oraz wytyczne organizacyjne ograniczenia hałasu oddziałującego na pracowników.

dr inż. Witold Mikulski, mgr inż. Izabela Warmiak (wimik@ciop.pl)

2015 r.

Streszczenie: *Materiał zawiera wytyczne techniczne modyfikacji akustycznej pomieszczeń, w których na stanowiskach pracy konieczne jest zapewnienie warunków akustycznych do pracy wymagającej koncentracji uwagi oraz wytyczne organizacyjne ograniczenia hałasu oddziałującego na pracowników. Składają się one z wytycznych technicznych i organizacyjnych modyfikacji akustycznej pomieszczeń i ich wyposażenia, wytycznych ograniczenia uciążliwości hałasu przez zastosowanie sygnałów maskujących w pomieszczeniach open space, wytycznych organizacyjnych dotyczących prowadzenia rozmów telefonicznych wpływających na zmniejszenie hałasu lub uciążliwości hałasu, metod obliczania chłonności akustycznej pomieszczenia, wytycznych uwzględnienia w metodach projektowania pomieszczeń ich właściwości akustycznych za pomocą programów do symulacji akustycznej wewnątrz oraz bibliografii. Projekt: II.B.04 II.P.13 Badania propagacji dźwięku i metod kształtowania warunków akustycznych w pomieszczeniach do pracy wymagającej koncentracji uwagi
Jednostka opracowująca: CIOP-PIB, Rok wydania 2015.*

Ocena akustyczna środowiska pracy w pomieszczeniach, w których konieczne jest zapewnienie warunków do pracy wymagającej koncentracji uwagi, jest oparta na porównaniu parametrów charakteryzujących właściwości akustyczne środowiska z ich wartościami dopuszczalnymi. Wartości dopuszczalne określone są w odpowiednich rozporządzeniach i normach, a zebrano je i opublikowano na stronach portalu Centralnego Instytutu Ochrony Pracy – Państwowego Instytutu Badawczego nt. czynników zagrożeń zawodowych (patrz „Wymagania akustyczne jakie powinno spełniać środowisko pracy dotyczące hałasu pod względem możliwości wykonywania pracy wymagającej koncentracji uwagi [1]).

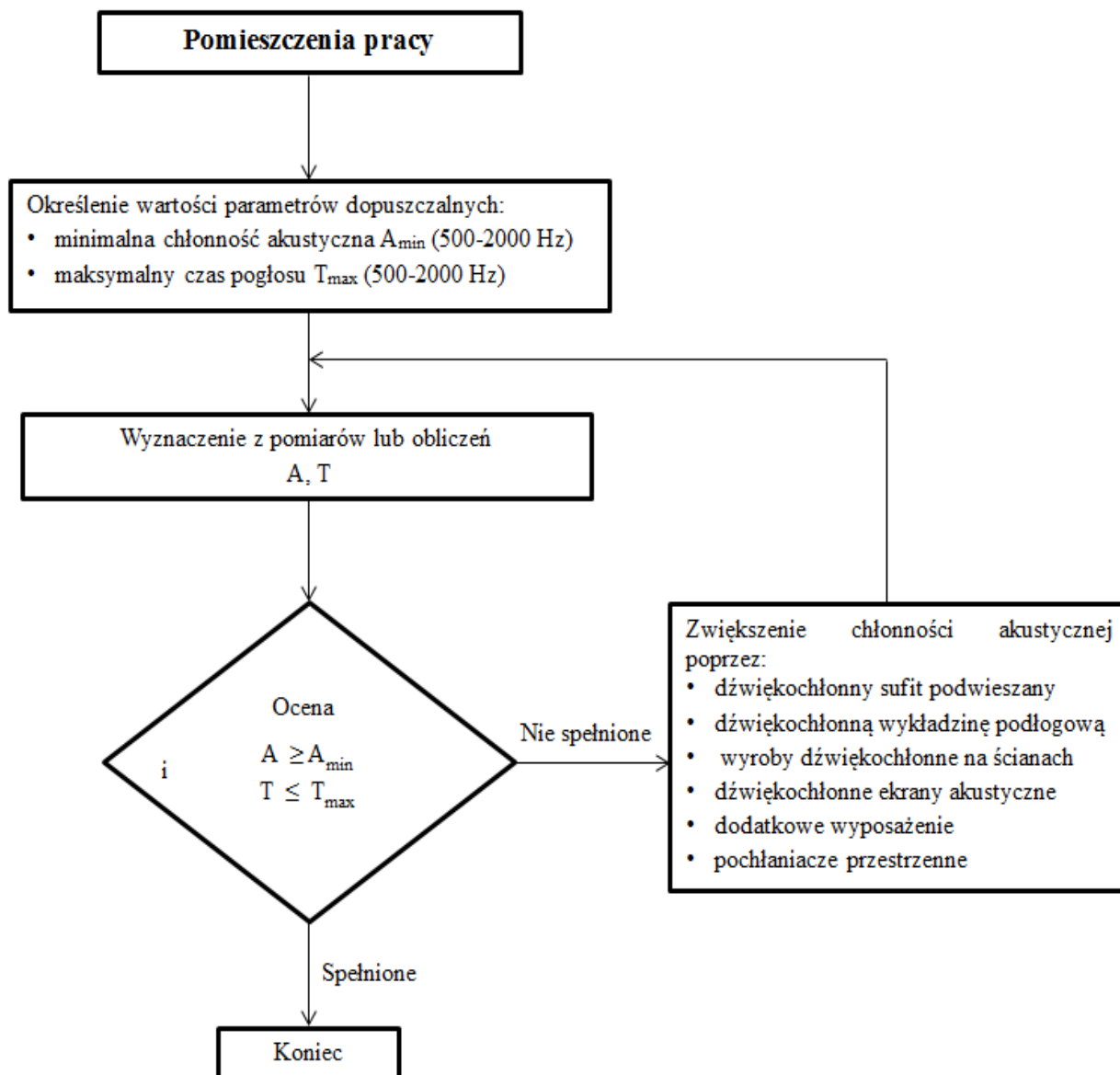
Wytyczne techniczne polegają na określeniu środków (rozwiązań) technicznych, które umożliwią uzyskanie warunków środowiska akustycznego odpowiednich do pracy wymagającej koncentracji uwagi.

Ze względu na właściwości akustyczne pomieszczeń oraz stawiane im wymagania określone parametrami charakteryzującymi właściwości akustyczne środowiska, w pomieszczeniach w których na stanowiskach pracy konieczne jest zapewnienie warunków akustycznych do pracy wymagającej koncentracji uwagi, wytyczne odnoszą się głównie do [2]: pomieszczeń biurowych „małych” (o kubaturze do ok. 70 m³, w którym pracuje 1-5 osób), pomieszczeń dużych tzw., wielkopowierzchniowych lub otwartych tj. open space (biurowych lub konsultantów telefonicznych), laboratoriów i pracowni, sal lekcyjnych i sal wykładowych (o kubaturze do 250 m³), pomieszczeń recepcji, bibliotek itp.

Wytyczne (techniczne i organizacyjne) modyfikacji akustycznej pomieszczeń

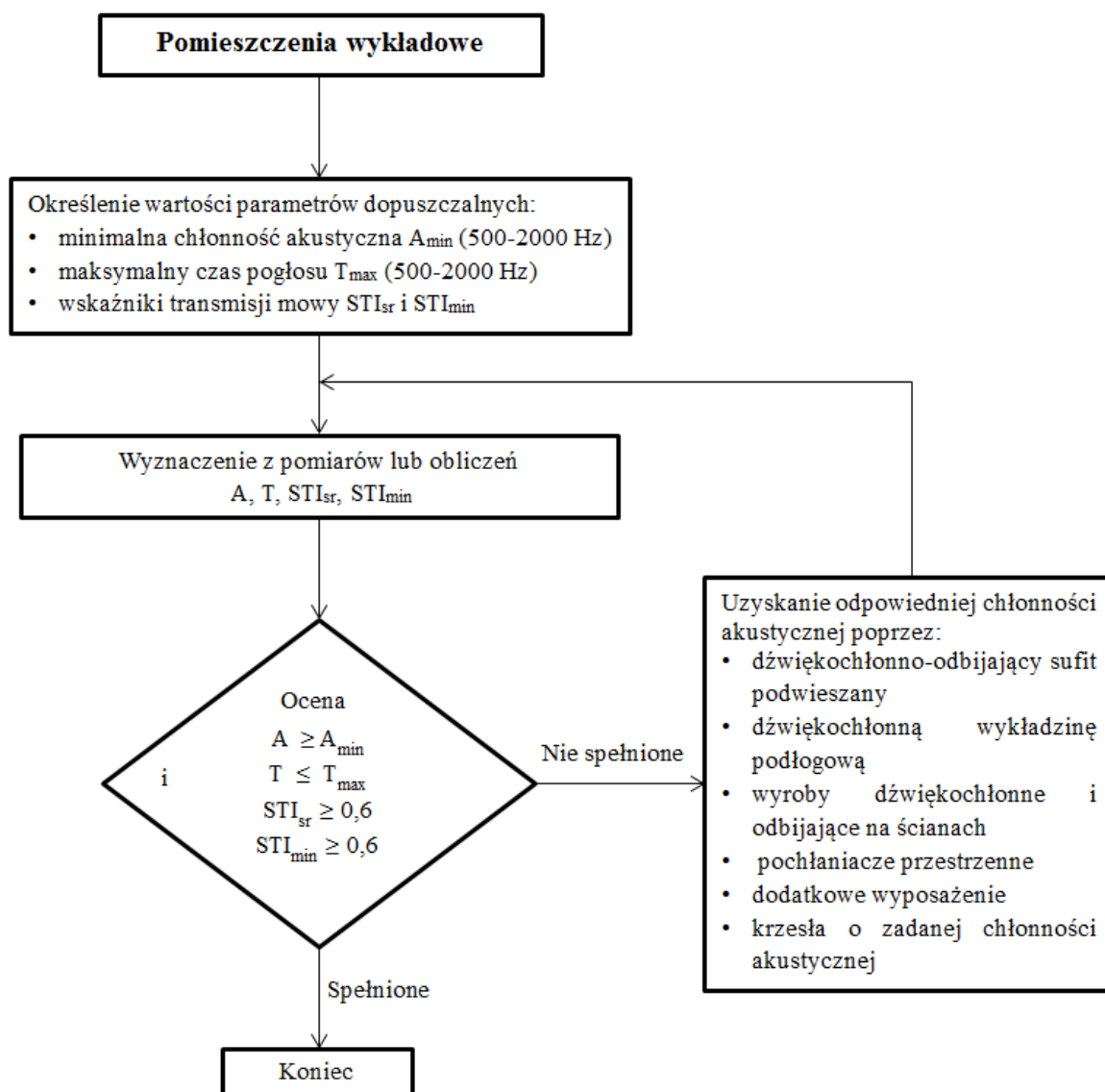
Środowisko akustyczne w pomieszczeniach pracy musi zapewniać jak najniższy poziom hałasu dźwięków niepożądanych oraz tam, gdzie jest to wymagane, zapewniać odpowiedni poziom zrozumiałości dźwięków pożądanых (komunikacja werbalna, sygnały bezpieczeństwa i informacyjne). W niektórych pomieszczeniach konieczne jest spełnienie wymagań dodatkowych wynikających ze specyfiki prowadzonych w nich prac (dotyczy np. pomieszczeń biurowych open space [1]). Poniżej opisano wytyczne, które pozwolą, przede wszystkim, ograniczyć hałas (w tym pogłosowy). Podstawowym środkiem technicznym będzie zwiększenie chłonności akustycznej pomieszczenia (szerszy opis w podrozdziale poniżej „Metoda obliczania chłonności akustycznej”). Minimalne wartości chłonności akustycznej pomieszczeń i/lub maksymalne wartości czasu pogłosu pomieszczeń określone są w normach, a zebrano je w [1]. Schemat postępowania podczas projektowania adaptacji akustycznej ogółu pomieszczeń, w których wymagania określone są tylko parametrami chłonnością akustyczną pomieszczenia lub czasem pogłosu pokazano na rys.1. Obejmuje on ocenę spełnienia wymagań w rozpatrywanym pomieszczeniu oraz metody modyfikacji adaptacji akustycznej.

Na podstawie badań CIOP-PIB, można stwierdzić, że w pomieszczeniach biurowych małych, laboratoriach i pracowniach, uzyskanie odpowiednich warunków akustycznych (odpowiednio dużej chłonności akustycznej) wymaga co najwyżej niewielkiego zwiększenia chłonności akustycznej pomieszczenia, co można uzyskać instalując dodatkowe wyposażenie (np. regały z książkami, stopy, dywany, krzesła tapicerowane). Wynika to z faktu, że w pomieszczeniach tych chłonność akustyczna jest na granicy wymaganej. Oczywiście lepszym rozwiązaniem będzie jednak pokrycie części ścian materiałami dźwiękochłonnymi. Zaleca się dla tych pomieszczeń stosować standardowe postępowanie podane w podrozdziale poniżej „Metoda obliczania chłonności akustycznej”.



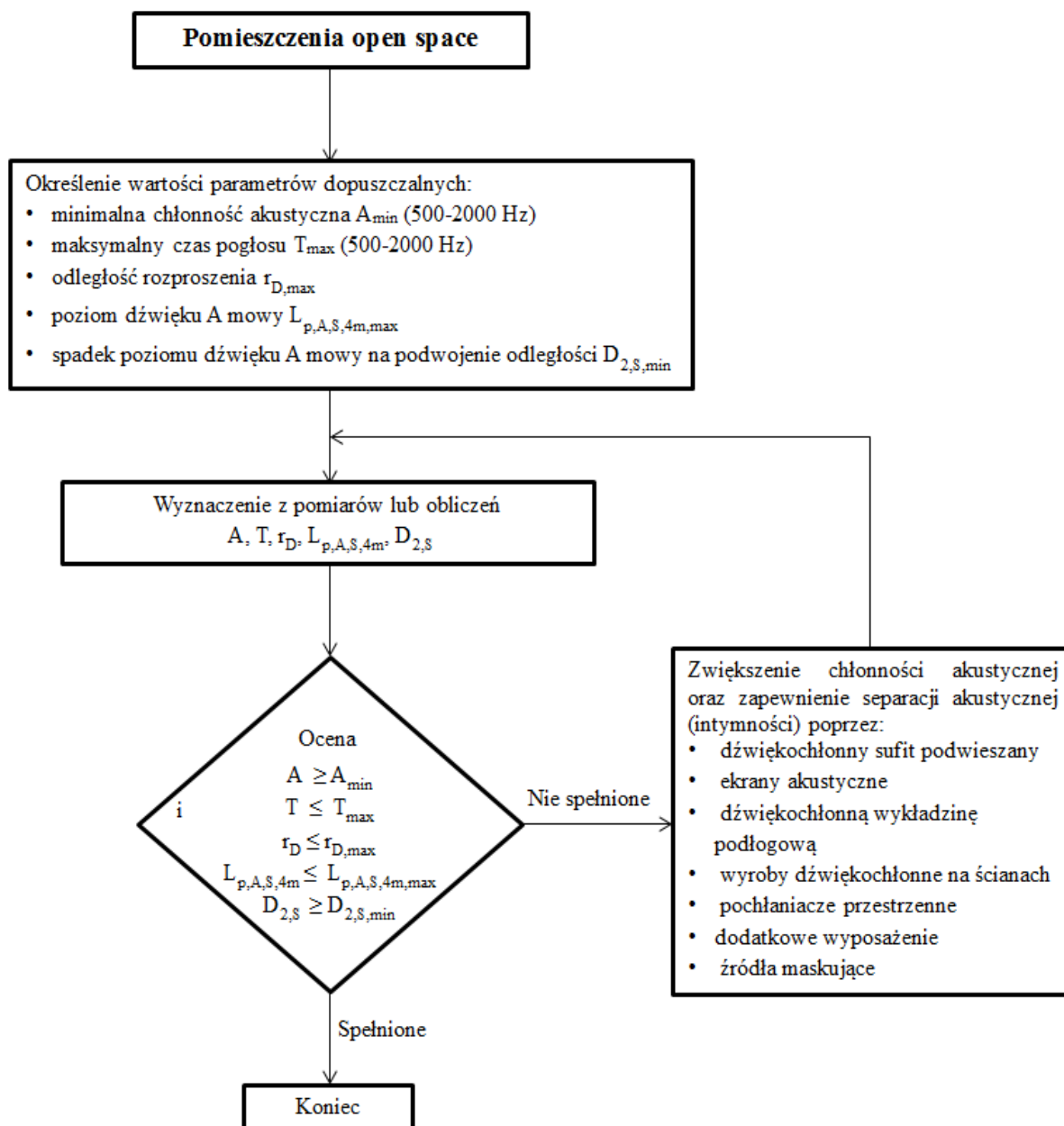
Rys.1. Schemat postępowania podczas projektowania adaptacji akustycznej dla ogółu pomieszczeń, w których wymagania określone są tylko parametrami chłonności akustycznej pomieszczenia lub czasem pogłosu.

Z badań autorów wytycznych wynika także, że w pomieszczeniach sal lekcyjnych i wykładowych konieczne jest znaczne zwiększenie chłonności akustycznej pomieszczeń oraz zapewnienie odpowiedniej zrozumiałości mowy. Schemat postępowania podczas projektowania adaptacji akustycznej tych pomieszczeń pokazano na rys.2.



Rys.2. Schemat postępowania podczas projektowania adaptacji akustycznej sal lekcyjnych i wykładowych, w których wymagana określone są tylko parametrami chłonnością akustyczną pomieszczenia lub czasem pogłosu.

W odniesieniu do sal lekcyjnych i wykładowych konieczne jest wykonanie projektu uwzględniającego warunki akustyczne (m.in. stosując metody podane niżej w podrozdziale „Metody obliczania chłonności akustycznej”). W przypadku pomieszczeń open space, będzie to niewystarczające. Schemat postępowania podczas projektowania adaptacji akustycznej pomieszczeń open space pokazano na rys.3.



Rys.3. Schemat postępowania podczas projektowania adaptacji akustycznej pomieszczeń open space.

W pomieszczeniach tych zachodzi konieczność zapewnienia specyficznych warunków akustycznych, do których oceny konieczne jest wyznaczenie (pomiarowo lub obliczeniowo) wielu parametrów oceny. Nawet w odniesieniu do chłonności akustycznej nie można wykorzystać podanej niżej w podrozdziale „Metody obliczania chłonności akustycznej” ponieważ jest ona zbyt bardzo uproszczona w odniesieniu do tych pomieszczeń. Konieczne więc będzie uwzględnienie zaawansowanych metod podanych niżej w podrozdziale

„Uwzględnienie w metodach projektowania pomieszczeń ich właściwości akustycznych za pomocą programów do symulacji akustycznej wnętrza”.

Zwiększenie chłonności akustycznej pomieszczeń obejmuje następujące działania (podane w kolejności od najbardziej skutecznych do najmniej skutecznych):

- *zastosowanie dźwiękochłonnego sufitu podwieszanego. Powinien on mieć jak największą powierzchnię (nie powinno być dużych fragmentów stropu nie zasłoniętych przez dźwiękochłonny sufit podwieszany). Wentylatory, klimatyzatory i punkty oświetleniowe mogą stanowić elementy sufitu, jednakże należy ograniczyć maksymalnie ich pole powierzchni. Dźwiękochłonny sufit powinien być podwieszony do stropu w odległości od niego jak największej (tj. najlepiej 1,4 m od stropu). Gdy nie ma takiej możliwości zaleca się, aby odległość ta była od 0,7 do 0,17 m (im większa tym lepiej). Podwieszenie sufitu w mniejszej odległości od stropu niż 0,7m lub jego przyklejenie do stropu, może spowodować duże problemy w uzyskaniu wystarczającej chłonności akustycznej pomieszczenia dla częstotliwości niskich (a nawet dla częstotliwości 500 Hz). Poza polem powierzchni sufitu, drugim czynnikiem mającym wpływ na uzyskanie odpowiednich warunków akustycznych w pomieszczeniu za pomocą sufitu dźwiękochłonnego, są właściwości materiałów dźwiękochłonnych w suficie. Określa się je poprzez współczynnik pochłaniania dźwięku materiału. Materiały dźwiękochłonne w suficie o największej chłonności akustycznej to te o klasie pochłaniania dźwięku „A” i ważonym współczynniku pochłaniania dźwięku α_w powyżej 0,9 (tabela 2), trochę słabsze właściwości dźwiękochłonne mają materiały o klasie pochłaniania dźwięku „B” i współczynnikach pochłaniania dźwięku materiału z zakresu 0,8-0,85. Materiał dźwiękochłonny o klasie pochłaniania dźwięku „C” i współczynniku pochłaniania dźwięku z zakresu 0,6-0,75 też mogą być wystarczające, co trzeba jednak zweryfikować obliczeniowo. Materiałów o klasie pochłaniania dźwięku „D” i „E” oraz tzw. niesklasyfikowanych jako nieefektywnych nie powinno się stosować. Szerszy opis dotyczący klasyfikacji materiałów znajduje się niżej w podrozdziale „Metody obliczania chłonności akustycznej”. Przyrost chłonności akustycznej pomieszczenia po zastosowaniu dźwiękochłonnego sufitu podwieszanego będzie równy chłonności akustycznej dźwiękochłonnego sufitu podwieszanego (iloczyn pola powierzchni i współczynnika pochłaniania dźwięku) pomniejszony o chłonność akustyczną sufitu i części ścian, które dźwiękochłonny sufit*

podwieszany zasłania. Obliczenia chłonności akustycznej pomieszczenia należy przeprowadzić według opisu podanego w podrozdziale poniżej „Metody obliczania chłonności akustycznej”,

- *zastosowanie materiałów dźwiękochłonnych na ścianach. W większości przypadków pomieszczeń (poza pomieszczeniami małymi np. biurowymi do 70 m³) dla uzyskania odpowiedniej chłonności akustycznej konieczne jest zastosowanie dźwiękochłonnego sufitu podwieszanego. Natomiast zastosowanie materiałów dźwiękochłonnych na ścianach jest celowe wówczas, gdy po zastosowaniu dźwiękochłonnego sufitu podwieszanego, nadal chłonność akustyczna pomieszczenia jest za mała. Materiał dźwiękochłonny powinno się instalować równomiernie na wszystkich ścianach (za wyjątkiem sal lekcyjnych i wykładowych, gdzie w pierwszej kolejności powinno się materiał dźwiękochłonny stosować na ścianie tylnej, a dopiero później na ścianach bocznych). Pole powierzchni materiału oraz jego właściwości dźwiękochłonne trzeba tak dobrać, aby przyrost chłonności akustycznej pomieszczenia spowodowany zastosowaniem materiału (iloczyn pola powierzchni materiału i współczynnika pochłaniania dźwięku materiału, pomniejszony o chłonność akustyczną części ścian, które materiał zasłania) umożliwił uzyskanie odpowiedniej chłonności akustycznej pomieszczenia. Na ścianach ze względu na ograniczone możliwości ich wykorzystania, najlepiej stosować materiały o jak najlepszych właściwościach dźwiękochłonnych (tj. o klasie pochłaniania dźwięku „A” i ważonym współczynniku pochłaniania dźwięku α_w powyżej 0,9),*
- *w przypadku stosowania w pomieszczeniu ekranów akustycznych (np. ekranów osłaniających źródła hałasu, ekranów rozdzielających pomieszczenie, ekranów przy stanowiskach pracy (te ostatnie np. w formie tzw. boksów)), powierzchnie ekranów powinny być wykonane z materiałów dźwiękochłonnych o możliwie jak najlepszych właściwościach pochłaniania dźwięku (szczególnie od strony źródła). W przypadku pomieszczeń biurowych ekrany należy umieszczać między pracownikami, w odległości 0,5-1,5 m od pracownika. W przypadku pomieszczeń open space wysokość ekranów powinna być jak największa. Za minimalną wysokość ekranów przy stanowiskach uznaje się 1,5 m od podłoża (tj. ok. 0,3 m powyżej głowy pracownika siedzącego). W pomieszczeniach open space może zachodzić konieczność stosowania ekranów przy stanowiskach o wysokości nawet ok. 2 m (co wynika z konieczności zapewnienia specjalnych*

warunków akustycznych [1]). Z innych względów (np. estetycznych) ekrany w części powyżej 1,5 m mogą być przezroczyste (jest to kompromis, który co prawda wpłynie negatywnie na warunki akustyczne, ale i tak taki ekran będzie dużo bardziej efektywny niż ekran o mniejszej wysokości). Ekran od dołu powinien szczelnie stykać się z podłożem (podłoga, dywan) lub, rozwiązanie gorsze, z blatem stanowiska pracy. Ekrany rozdzielające pomieszczenie powinny być jak najwyższe, z tym, że ponad ekranem ze względów wentylacyjnych musi być prześwit minimum 0,2 m. Ze względów na ewakuację, pomiędzy ekranem i ścianą z jednej strony pomieszczenia musi być przerwa 1,4 m. Zmniejszenie poziomu dźwięku A na stanowiskach pracy w pomieszczeniu po zastosowaniu ekranu w większości przypadków zawiera się w zakresie 3-6 dB (maksimum 10 dB). Dlatego izolacyjność akustyczna ekranu akustycznego powinna przekraczać 15 dB (wg. EN ISO 17624:2004 ogólnie zaleca się, żeby izolacyjność akustyczna właściwa $R'_w \geq 20$ dB).

Techniczne i organizacyjne metody umożliwiające ograniczenie hałasu (w tym pogłosowego) lub ograniczenie uciążliwości hałasu oddziaływującego na pracowników w pomieszczeniach polegają na:

- *umieszczeniu klimatyzatorów poza rozpatrywanymi pomieszczeniami pracy,*
- *lokalizacji miejsc do odpoczynku (socjalnych) i kuchni poza rozpatrywanymi pomieszczeniami. Pomieszczenia te od innych pomieszczeń należy odgrodzić drzwiami lub akustycznie je odseparować korytarzami o dużej chłonności akustycznej (uniemożliwiającymi przenoszenie się hałasu między tymi pomieszczeniami),*
- *do prowadzenia rozmów telefonicznych i telekonferencji należy wykonać odpowiednio kabiny telefoniczne i pomieszczenia do telekonferencji. Kabiny te należy oddzielić drzwiami od rozpatrywanych pomieszczeń pracy,*
- *w sąsiedztwie rozpatrywanych pomieszczeń pracy należy wykonać pomieszczenia na spotkania, narady oraz konsultacje. Powinny one być odseparowane od rozpatrywanych pomieszczeń drzwiami,*
- *szatnie i szafy ubraniowe powinny się lokalizować poza rozpatrywanymi pomieszczeniami pracy,*

- *wszystkie drzwi (szczególnie do innych pomieszczeń i na korytarz) powinny być zamykane (np. zastosowanie samozamykaczy lub alarmów przy zbyt długo trwającym ich otwarciu),*
- *urządzenia hałasujące (w tym także techniczne wyposażenie budynku; np. klimatyzatory, kserografy, drukarki sieciowe, szafy krosownicze) należy zlokalizować w innych pomieszczeniach niż rozpatrywane, odgrodzonymi drzwiami lub akustycznie odseparowanymi korytarzami o dużej chłonności akustycznej uniemożliwiającymi przenoszenie się hałasu między tymi pomieszczeniami,*
- *ściany rozpatrywanych pomieszczeń pracy nie mogą sąsiadować z serwerowniami. Jeżeli ze względów technicznych jest to konieczne, to należy odpowiednio zwiększyć, niż to podano w wymaganiach, izolacyjność akustyczną ścian oraz ograniczyć przenikający hałas niskoczęstotliwościowy (m.in. wibroizolacja serwerów),*
- *ściany zewnętrzne rozpatrywanych pomieszczeń nie mogą znajdować się przy drogach o dużym nasileniu ruchu (szczególnie ciężarowego, szynowego i lotniczego). Jeżeli ze względów technicznych jest to konieczne, to należy odpowiednio zwiększyć, izolacyjność akustyczną ścian.*

Wytyczne ograniczenia uciążliwości hałasu przez zastosowanie sygnałów maskujących w pomieszczeniach open space

W wielu pomieszczeniach należy zapewnić dobrą zrozumiałość mowy np. w salach wykładowych i salach lekcyjnych. W niektórych pomieszczeniach zrozumiałość mowy powinna być zapewniona na bliskich odległościach, a w większych odległościach jest już niepożądana np. sale recepcyjne, apteki. W większości jednak pomieszczeń pracy, mimo pracy w nich wielu pracowników, nie ma potrzeby, a nawet nie jest wskazane, aby pracownicy rozumieli treści rozmów innych pracowników (to ich rozprasza i zwiększa uciążliwość; np. biura open space i centra obsługi klientów). We wszystkich tych przypadkach w pierwszych krokach projektowania należy zapewnić odpowiednie warunki pogłosowe (chłonność akustyczna pomieszczenia) i odseparować stanowiska pracy ekranami akustycznymi (patrz wyżej). Jednakże może się okazać, że nie uzyskuje się ww. metodami wymaganej separacji akustycznej stanowisk pracy określonej parametrami odległością rozproszenia i odległością prywatności [1]. Wówczas konieczne jest zastosowanie źródeł dźwięków maskujących sygnały

mowy. Przypadek taki zachodzi, gdy poziom dźwięku A tła akustycznego jest za mały, aby uzyskać spełnienie warunków na odległości rozproszenia i odległości prywatności (poziom dźwięku A tła akustycznego jest rzędu 20-30 dB). Wówczas należy zastosować źródła dźwięku emitujące dźwięki przyjazne dla pracowników lub szum lub „gwar rozmów” o poziomach, które trzeba określić w taki sposób, aby ww. odległość rozproszenia była mniejsza od 5 m (tj. wskaźnik transmisji mowy STI w odległości 5 m od źródła mowy powinien mieć wartość nie większą od 0,5). Najłatwiej ten parametr określić obliczeniowo za pomocą odpowiedniego programu komputerowego (patrz podrozdział niżej „Uwzględnienie w metodach projektowania pomieszczeń ich właściwości akustycznych za pomocą programów do symulacji akustycznej wnętrza”). Z badań autorów wynika, że poziom tych sygnałów nie powinien być większy niż 40 dB. Pamiętać należy, że poziom tego sygnału nie może przekroczyć wartości dopuszczalnych hałasu tła od wszystkich źródeł, podanej w [1].

Wytyczne organizacyjne dotyczące rozmów telefonicznych wpływające na zmniejszenie hałasu lub uciążliwości hałasu

Pracownicy powinni powodować jak najmniejszy hałas, w tym również powinni maksymalnie ograniczyć rozmowy w rozpatrywanych pomieszczeniach pracy. W przypadku konieczności prowadzenia rozmów, powinni ograniczyć „poziom natężenia głosu” do niezbędnego i komfortowego minimum (poziom dźwięku A mowy głosem normalnym to 60-65 dB w odległości 1m od mówiącego). Rozmowy, w tym telefoniczne, powinny być prowadzone w pozycji siedzącej, twarzą skierowaną do najbliższych ekranów akustycznych. Rozmowy prywatne, szczególnie przez telefony komórkowe, powinny być prowadzone w ww. kabinach. Dzwonki telefonów powinny być wyciszone, a sygnały powinny się ustawić na jak najmniej uciążliwe dla innych pracowników.

Metoda obliczania chłonności akustycznej

Proces projektowania adaptacji akustycznej pomieszczenia umożliwia uzyskanie zadanych warunków środowiska akustycznego i obejmuje zapewnienie w pomieszczeniach warunków akustycznych pod względem: ograniczenia hałasu tła, odpowiedniej chłonności akustycznej oraz odpowiedniej zrozumiałości mowy. W celu zapewnienia tych warunków należy zaproponować różne rozwiązania techniczne adaptacji akustycznej pomieszczeń i przy pomocy obliczeń np. za pomocą symulacyjnych programów komputerowych (patrz podrozdział następny) zweryfikować ich osiągnięcie porównując obliczone wartości parametrów z wartościami dopuszczalnymi (podanymi [1]; rys.1-3).

W większości pomieszczeń wystarczy uwzględnić w projektach warunki pogłosowe pomieszczeń określone chłonnością akustyczną pomieszczeń. W salach wykładowych, salach lekcyjnych i biurach open space konieczne jest spełnienie dodatkowych wymagań [1], a zapewnienie odpowiedniej chłonności akustycznej jest pierwszym etapem projektu. Poniżej podano metodę obliczania chłonności akustycznej pomieszczenia zgodną z PN-B-02151-4:2015 [3].

Chłonność akustyczna pomieszczenia (oznaczona literą A) to miara jego całkowitej zdolności do pochłaniania i tłumienia dźwięków. Na chłonność akustyczną pomieszczenia składa się chłonność akustyczna wszystkich powierzchni wewnętrznych (ograniczających pomieszczenie), znajdującego się w nim wyposażenia oraz powietrza. Określa się ją, w m^2 , ze wzoru:

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

gdzie:

$A_{powierzchni}$ – chłonność akustyczna powierzchni ograniczających pomieszczenie, w m^2 ;

$A_{wyposazenie}$ - chłonność akustyczna elementów wyposażenia, w m^2 ;

A_{air} - chłonność akustyczna wynikająca z pochłaniania dźwięku w powietrzu, w m^2 ;

n - liczba powierzchni ograniczających pomieszczenie;

o - liczba elementów wyposażenia dla których określono chłonność akustyczną;

α_i - współczynnik pochłaniania dźwięku i -tej powierzchni ograniczającej pomieszczenie;

S_i - pole powierzchni i -tej powierzchni ograniczającej pomieszczenie, m^2 ;

$A_{obj,j}$ - chłonność akustyczna j -tego elementu wyposażenia, w m^2 ;

m - mocowy współczynnik pochłaniania dźwięku w powietrzu, w neperach na metr (tabela 1);

V - kubatura pomieszczenia, w m^3 .

Tabela 1. Mocowy współczynnik pochłaniania dźwięku, m

Lp.	Temperatura/wilgotność względna powietrza	Mocowy współczynnik pochłaniania dźwięku, m , w powietrzu w pasmach oktaowych o środkowej częstotliwości, f		
		Np/m		
		500 Hz	1000 Hz	2000 Hz
1	20°C / 30 - 50 %	0,0006	0,0010	0,0019
2	20°C / 50 - 70 %	0,0006	0,0010	0,0017

Współczynnik pochłaniania dźwięku α materiału to parametr, za pomocą którego określa się właściwości dźwiękochłonne materiałów i wyrobów. 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 chłonność akustyczna pomieszczenia (tak, jak i współczynnik pochłaniania dźwięku materiałów) zależy od częstotliwości dźwięku, to tak jak w wymaganiach dotyczących pomieszczeń, a jednocześnie zgodnie z normą PN-B-02151-4, określa się ją w oktaowych pasmach częstotliwości o częstotliwościach środkowych: 500, 1000 i 2000 Hz [3].

W przypadku, gdy chłonność akustyczna pomieszczenia (dla częstotliwości 500 lub 1000 lub 2000 Hz) jest za mała, należy ją zwiększyć, albo przez zwiększenie chłonności akustycznej powierzchni ograniczających pomieszczenie (pokrycie ich materiałem o większym współczynniku pochłaniania dźwięku, niż jest obecnie) lub dodaniu we wnętrzu wyposażenia (patrz wzór powyżej).

Producenci materiałów i wyrobów dźwiękochłonnych określają ich właściwości dźwiękochłonne w zakresie częstotliwości ok. 100-4000 Hz. Parametrem określającym te właściwości jest jednoliczbowy wskaźnik - ważony współczynnik pochłaniania dźwięku α_w , którego wartości są zaokrąglane do wielokrotności liczby 0,05. Związany on jest z tzw. klasą pochłaniania dźwięku materiału/wyrobu (patrz tabela 2).

Tabela 2. Klasy pochłaniania dźwięku wyrobów (materiałów) wg PN-EN ISO 11654:1999 [4]

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	Nieklasyfikowane

Materiałem, który najlepiej pochłania dźwięk, jest ten, który charakteryzuje się największym ważonym współczynnikiem pochłaniania dźwięku α_w tj. równym lub wyższym od 0,90; oznaczony klasą pochłaniania dźwięku „A”.

Ze względu na to, że w metodzie obliczenia chłonności akustycznej pomieszczenia obliczenia przeprowadza się dla częstotliwości: 500, 1000 i 2000Hz, przy obliczeniach

konieczna jest znajomość współczynników pochłaniania dźwięku materiałów dla tych częstotliwości. Określone są one przez producentów materiałów.

Proces projektowania adaptacji akustycznej pomieszczenia ma charakter iteracyjny (rys. 1-3).

Po określeniu wymaganej chłonności akustycznej pomieszczenia, na początku projektowania (krok 1) oblicza się chłonność akustyczną pomieszczenia bez uwzględnienia wytycznych dotyczących uzyskania odpowiednich warunków akustycznych (podanych wyżej). Jeżeli dla wszystkich ww. częstotliwości jest ona większa od wymaganej [1], to nie jest konieczne uwzględnienie jakichkolwiek zmian w projekcie (uwzględniających modyfikację warunków akustycznych pomieszczenia), rys.1. Jeżeli chłonność akustyczna jest mniejsza od wymaganej, to należy ją zwiększyć metodami podanymi wyżej (postępowanie w kroku 2). Następnie należy sprawdzić, czy chłonność akustyczna pomieszczenia już osiągnęła wymagane wartości [1]. Jeżeli tak, to projekt należy uzupełnić o zastosowane metody i proces projektowania jest skończony.

Jeżeli nie to należy dalej wprowadzać nowe elementy, aż do osiągnięcia wymaganej chłonności akustycznej pomieszczenia.

W celu określenia chłonności akustycznej pomieszczenia należy:

- określić wymiary pomieszczenia (w tym pole powierzchni rzutu pomieszczenia oraz kubaturę),*
- określić pole powierzchni ograniczających pomieszczenie (m.in. ścian, stropu, podłogi, okien, drzwi, itp.),*
- określić współczynniki pochłaniania dźwięku α powierzchni ograniczających pomieszczenie (dla częstotliwości 500, 1000 i 2000 Hz),*
- określić chłonność akustyczną elementów wyposażenia (dla częstotliwości 500, 1000 i 2000 Hz),*
- określić chłonność akustyczna wynikająca z pochłaniania dźwięku przez powietrze (dla częstotliwości 500, 1000 i 2000 Hz).*

Chłonność akustyczną pomieszczenia (oddzielnie w odniesieniu do każdego z pasm częstotliwości 500, 1000 i 2000 Hz), oblicza się, w m^2 , ze wzoru 1.

Przykład

Niżej przedstawiono przykład obliczania chłonności akustycznej pomieszczenia otwartego do prac administracyjnych, czyli tzw. biurowego open space (wymiary pomieszczenia: 11,7 x 7,2 x 3,4 m, kubatura pomieszczenia: 286,4 m³).

W tabeli 3 podano wyniki obliczeń chłonności akustycznej powierzchni ograniczających rozpatrywane pomieszczenie $A_{\text{powierzchni}}$.

W tabeli 4 podano wyniki obliczeń chłonności akustycznej wyposażenia $A_{\text{wyposazenie}}$ rozpatrywanego pomieszczenia.

W tabeli 5 podano wyniki obliczeń chłonności akustycznej wynikającej z pochłaniania dźwięku przez powietrze A_{air} rozpatrywanego pomieszczenia.

Tabela 3. Przykład obliczenia chłonności akustycznej powierzchni ograniczających pomieszczenie $A_{\text{powierzchni}}$

Elementy pomieszczenia	Pole powierzchni [m ²]	Współczynnik pochłaniania dźwięku α powierzchni ograniczającej pomieszczenie			Chłonność akustyczna powierzchni ograniczającej pomieszczenie [m ²]		
		500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz
Strop - Beton szorstki	78,24	0,03	0,03	0,04	2,35	2,35	3,13
Podłoga - Dywan z przędzy włosiowej na piance poliuretanowe	84,2	0,35	0,65	0,62	29,47	54,73	52,20
3 ściany – Tynk cementowo-wapienny na murze, malowany	79,6	0,02	0,02	0,02	1,59	1,59	1,59
1 ściana – Płyta gipsowo-kartonowa o grubości 12,5 mm na stelażu stalowym z pustką 100 mm wypełnioną wełną mineralną	24,5	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 $A_{\text{powierzchni}}$ [m²]					45,83	66,54	66,81

Tabela 4. Przykład obliczenia chłonności akustycznej wyposażenia $A_{\text{wyposazenie}}$

Elementy wyposażenia pomieszczenia	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
Meble biurowe	10 szt.	0,45	0,45	0,6	4,50	4,50	6,00
Krzeseł tapicerowane	10 szt.	0,3	0,35	0,4	3,00	3,50	4,00
Chłonność akustyczna wyposażenia pomieszczenia $A_{\text{wyposazenie}}$ [m²]					7,50	8,00	10,00

Tabela 5. Przykład obliczenia chłonności akustycznej wynikającej z pochłaniania dźwięku przez powietrze A_{air} (dla wilgotności względnej powietrza od 30% do 50%)

Kubatura pomieszczenia $V [m^3]$	Mocowy współczynnik pochłaniania dźwięku, przez powietrze, $m, [Np/m]$			Chłonność akustyczna wynikająca z pochłaniania dźwięku przez powietrze $[m^2]$		
	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz
286,4	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

Obliczoną chłonność akustyczną pomieszczenia biurowego open space porównuje się z wartością minimalną obliczoną jako iloraz pola powierzchni podłogi i wartości minimalnej chłonności pomieszczenia odniesionej do metra kwadratowego podłogi [1] (w rozpatrywanym przypadku wynosi $92,66 m^2$ tabela 6).

Tabela 6. Chłonność akustyczna pomieszczenia biurowego open space

Elementy pomieszczenia	Chłonność akustyczna $[m^2]$		
	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz
Chłonność akustyczna powierzchni ograniczających pomieszczenie $A_{powierzchni} [m^2]$	45,83	66,54	66,81
Chłonność akustyczna wyposażenia $A_{wyposazenie} [m^2]$	7,50	8,00	10,00
Chłonność akustyczna wynikająca z pochłaniania dźwięku przez powietrze $A_{air} [m^2]$	0,69	1,15	2,18
Chłonność akustyczna pomieszczenia	54,02	75,68	78,99
Minimalna wymagana chłonność akustyczna pomieszczenia	92,66	92,66	92,66

Jak widać chłonność akustyczna pomieszczenia jest za mała i trzeba wprowadzić do projektu adaptacji akustycznej pomieszczenia modyfikację polegającą na zwiększeniu chłonności akustycznej pomieszczenia np. przez instalację sufitu podwieszanego (zaproponowano dźwiękochłonny sufit podwieszany z materiałem dźwiękochłonnym klasy pochłaniania dźwięku „A”).

W tabeli 7 podano wyniki obliczeń chłonności akustycznej powierzchni ograniczających pomieszczenie $A_{powierzchni}$ w odniesieniu do rozpatrywanego pomieszczenia z uwzględnieniem dźwiękochłonnego sufitu podwieszanego z materiałem dźwiękochłonnym klasy pochłaniania

dźwięku „A” (współczynniki pochłaniania dźwięku w pasmach częstotliwości 500, 1000 i 2000 Hz wynoszą odpowiednio 0,95; 0,9 i 1,0).

Tabela 7. Wyniki obliczeń chłonności akustycznej powierzchni ograniczających pomieszczenie $A_{\text{powierzchni}}$ z uwzględnieniem dźwiękochłonnego sufitu podwieszanego klasy pochłaniania dźwięku „A”

Elementy pomieszczenia	Pole powierzchni [m ²]	Współczynnik pochłaniania dźwięku α powierzchni ograniczającej pomieszczenie			Chłonność akustyczna powierzchni ograniczającej pomieszczenie [m ²]		
		500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz
Strop - Beton szorstki (część wokół dźwiękochłonnego sufitu podwieszanego)	17,9	0,03	0,03	0,04	0,54	0,54	0,72
Dźwiękochłonny sufit podwieszanego klasy pochłaniania dźwięku A	60,34	0,95	0,90	1,00	57,32	54,31	60,34
Podłoga - Dywan z przędzy włosiowej na piance poliuretanowe	84,2	0,35	0,65	0,62	29,47	54,73	52,20
3 ściany – Tynk cementowo-wapienny na murze, malowany	79,6	0,02	0,02	0,02	1,59	1,59	1,59
1 ściana – Płyta gipsowo-kartonowa o grubości 12,5 mm na stelażu stalowym z pustką 100 mm wypełnioną wełną mineralną	24,5	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 $A_{\text{powierzchni}}$ [m ²]					101,34	118,50	124,02

Obliczoną chłonność akustyczna pomieszczenia biurowego open space (z uwzględnieniem dźwiękochłonnego sufitu podwieszanego klasy pochłaniania dźwięku „A”) porównuje się z obowiązującymi przepisami (tabela 8).

Tabela 8. Chłonność akustyczna pomieszczenia z uwzględnieniem dźwiękochłonnego sufitu podwieszanego klasy pochłaniania dźwięku „A”

Elementy pomieszczenia	Chłonność akustyczna [m ²]		
	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz
Chłonność akustyczna powierzchni ograniczających pomieszczenie $A_{\text{powierzchni}}$ [m ²]	101,34	118,50	124,02
Chłonność akustyczna wyposażenia $A_{\text{wyposażenia}}$ [m ²]	7,50	8,00	10,00
Chłonność akustyczna wynikająca z pochłaniania dźwięku przez powietrze [m ²] A_{air}	0,69	1,15	2,18
Chłonność akustyczna pomieszczenia	109,53	127,65	136,2
Minimalna wymagana chłonność akustyczna pomieszczenia	92,66	92,66	92,66

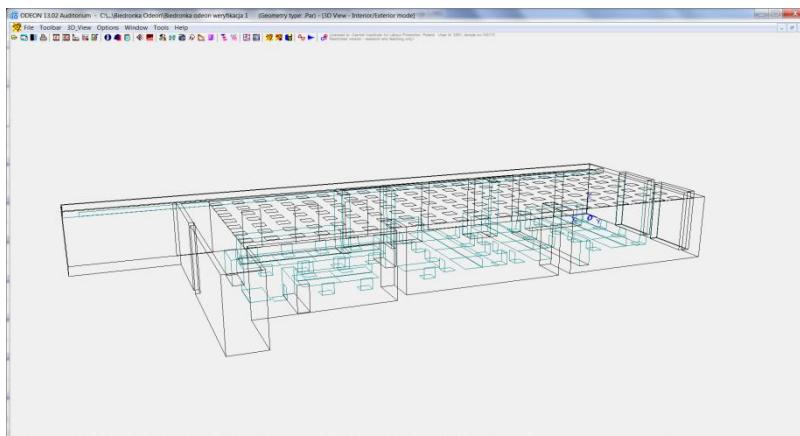
Na podstawie wyników obliczeń pokazanych w tabeli 8 można stwierdzić, że po uwzględnieniu dźwiękochłonnego sufitu podwieszanego klasy pochłaniania dźwięku „A”, wartości chłonności akustycznej pomieszczenia, we wszystkich pasmach częstotliwości (500, 1000 i 2000 Hz), znacznie przekraczają wartości wymagane, tj. osiągnięto minimalną wymaganą chłonność akustyczną pomieszczenia według PN-B-02151-4:2015 [3].

Uwzględnienie w metodach projektowania pomieszczeń ich właściwości akustycznych za pomocą programów do symulacji akustycznej wewnątrz

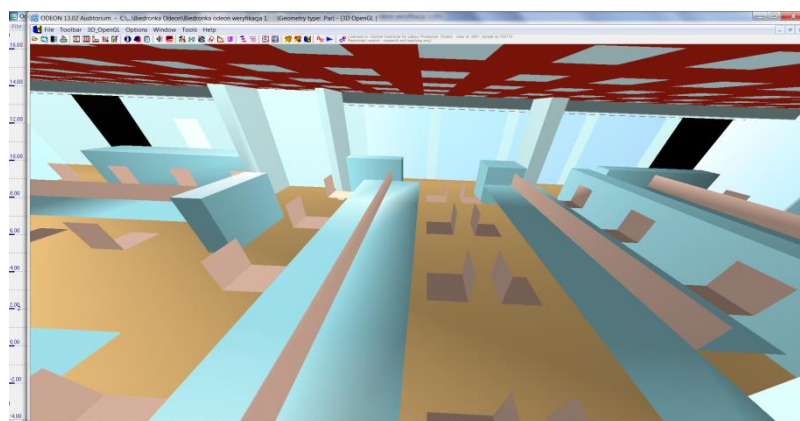
Programy do symulacji akustycznych wewnątrz można zastosować do wszystkich rodzajów pomieszczeń, w tym pomieszczeń pracy. Są one najbardziej efektywnym narzędziem w odniesieniu do pomieszczeń, dla których wymagania określone są dużą liczbą parametrów. Dlatego poniżej przedstawi się ich wykorzystanie w odniesieniu do pomieszczenia biurowego open space.

Na rys. 4 pokazano widok pomieszczenia wygenerowany przez program zastosowany do symulacji akustycznej wewnątrz. Obiektem było pomieszczenie biurowe open space o kubaturze 664 m^3 , polu powierzchni całkowitej 634 m^2 , polu powierzchni podłogi 218 m^2 i wysokości $3,05 \text{ m}$.

a)



b)



Rys. 4 Widoki rozpatrywanego pomieszczenia (wygenerowane w programie komputerowym)

Poziom dźwięku A tła akustycznego w pomieszczeniu wynosił 32,8 dB.

Wyniki pomiarów parametrów charakteryzujących właściwości akustyczne pomieszczenia przed adaptacją akustyczną oraz kolejne wyniki pomiarów z zaznaczeniem kolejno uwzględnianych elementów adaptacji akustycznej podano w tabeli 9.

Tabela 9. Wybrane wyniki symulacji akustycznej parametrów charakteryzujących właściwości akustyczne pomieszczenia dla różnych rozwiązań adaptacji akustycznych oraz maskowania sygnałów mowy o różnych poziomach (kolorem czerwonym tła oznaczono nie spełnianie kryterium, a kolorem zielonym spełnianie kryterium)

Uwzględniane elementy	przed adaptacją	po adaptacji
Sufity podwieszane	typ „C”	typ „B”
Sufit podwieszany dodatkowy	-	typ „B”
Materiał ekranu akustycznego	drewno	typ „B”

		<i>Wysokość ekranu akustycznego</i>	<i>1,1 m</i>	<i>1,5 m</i>	<i>2,1 m</i>		
		<i>Liczba kasetonów lamp i wentylacji</i>	<i>147</i>		<i>30</i>		
		<i>Poziom dźwięku A tła akustycznego [dB]</i>	<i>32,8 dB</i>				<i>38,0 dB</i>
<i>Parametr</i>	<i>Wymagania</i>		<i>Wyniki obliczeń</i>				
<i>T [s]</i>	<i>500 Hz</i>	<i>< 0,43 s</i>	<i>0,51 s</i>	<i>0,39 s</i>	<i>0,36 s</i>	<i>0,35 s</i>	<i>0,35 s</i>
	<i>1000 Hz</i>	<i>< 0,43 s</i>	<i>0,54 s</i>	<i>0,41 s</i>	<i>0,41 s</i>	<i>0,38 s</i>	<i>0,38 s</i>
	<i>2000 Hz</i>	<i>< 0,43 s</i>	<i>0,56 s</i>	<i>0,43 s</i>	<i>0,41 s</i>	<i>0,39 s</i>	<i>0,39 s</i>
<i>r_D</i>	<i>≤ 5 m</i>		<i>11,0 m</i>	<i>9,8 m</i>	<i>9,6 m</i>	<i>8,1 m</i>	<i>4,3 m</i>
<i>D_{2,s}</i>	<i>≥ 7 dB</i>		<i>6,5 dB</i>	<i>5,2 dB</i>	<i>5,6 dB</i>	<i>7,2 dB</i>	<i>7,2 dB</i>
<i>L_{p,A,S,4m}</i>	<i>≤ 48 dB</i>		<i>51,0 dB</i>	<i>46,5 dB</i>	<i>46,3 dB</i>	<i>45,4 dB</i>	<i>45,4 dB</i>

Oznaczenia:

T – czas pogłosu,

r_D - odległość rozproszenia,

D_{2,s} - spadek poziomu dźwięku mowy na podwojenie odległości od źródła mowy,

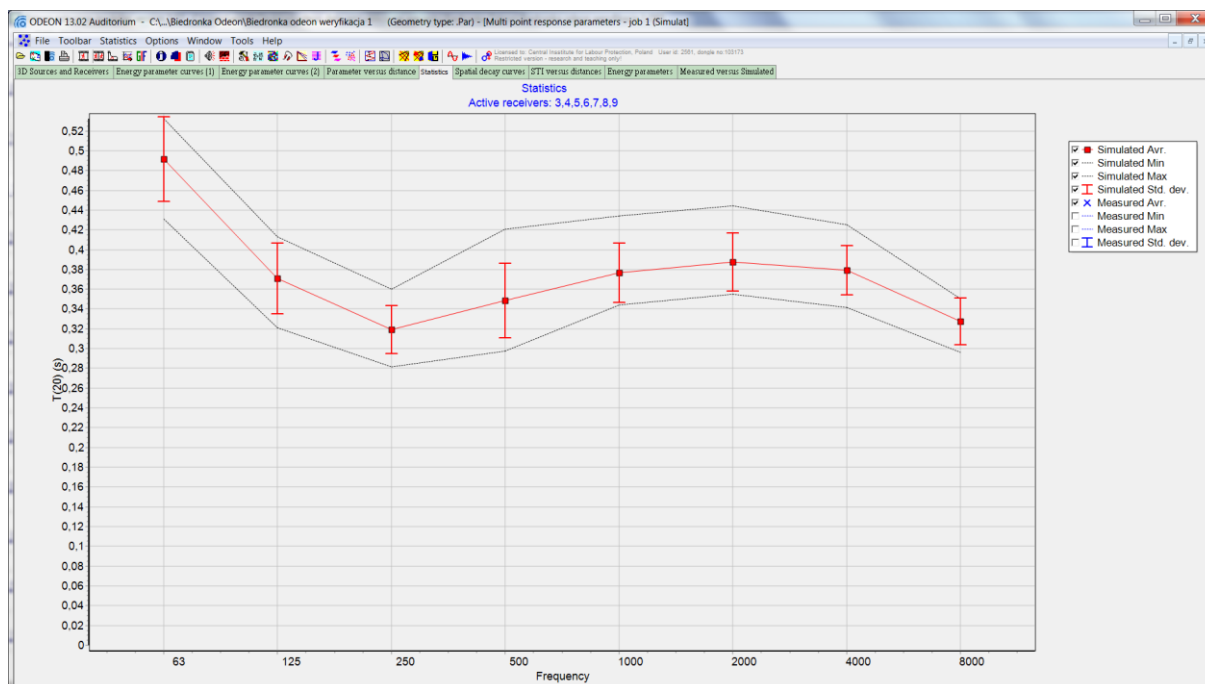
L_{p,A,S,4m} - poziom dźwięku A mowy w odległości 4 m od źródła mowy.

Ostatnia adaptacja akustyczna pomieszczenia obejmowała elementy:

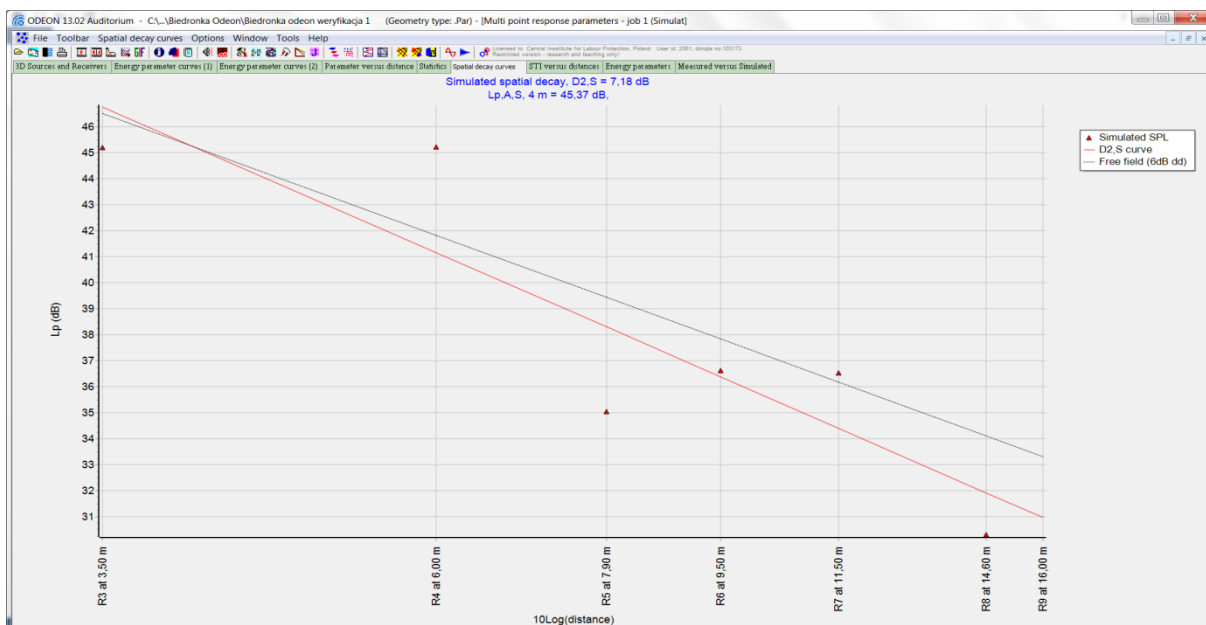
- wymiana materiału dźwiękochłonnego w dźwiękochłonnym suficie podwieszanym z klasy pochłaniania dźwięku „C” na „B”,
- dodanie w pomieszczeniu dźwiękochłonnego sufitu podwieszanego klasy pochłaniania dźwięku „B” w części sufitu, gdzie go nie było,
- zmniejszenia liczby kasetonów oświetleniowych i wentylacyjnych z 147 do 30 (w powstałych otworach zastosowano materiał dźwiękochłonny klasy pochłaniania dźwięku „B”),
- pokryciu drewnianej powierzchni ekranów akustycznych materiałem dźwiękochłonnym klasy pochłaniania dźwięku „B”,
- zwiększeniem wysokości ekranów dźwiękochłonnych z 1,1 m na 2,1 m,
- wprowadzeniem źródeł maskujących sygnały mowy, o poziomie dźwięku A 38 dB.

Wyniki obliczeń parametrów charakteryzujących właściwości akustyczne pomieszczenia po ostatniej adaptacji akustycznej pokazano na:

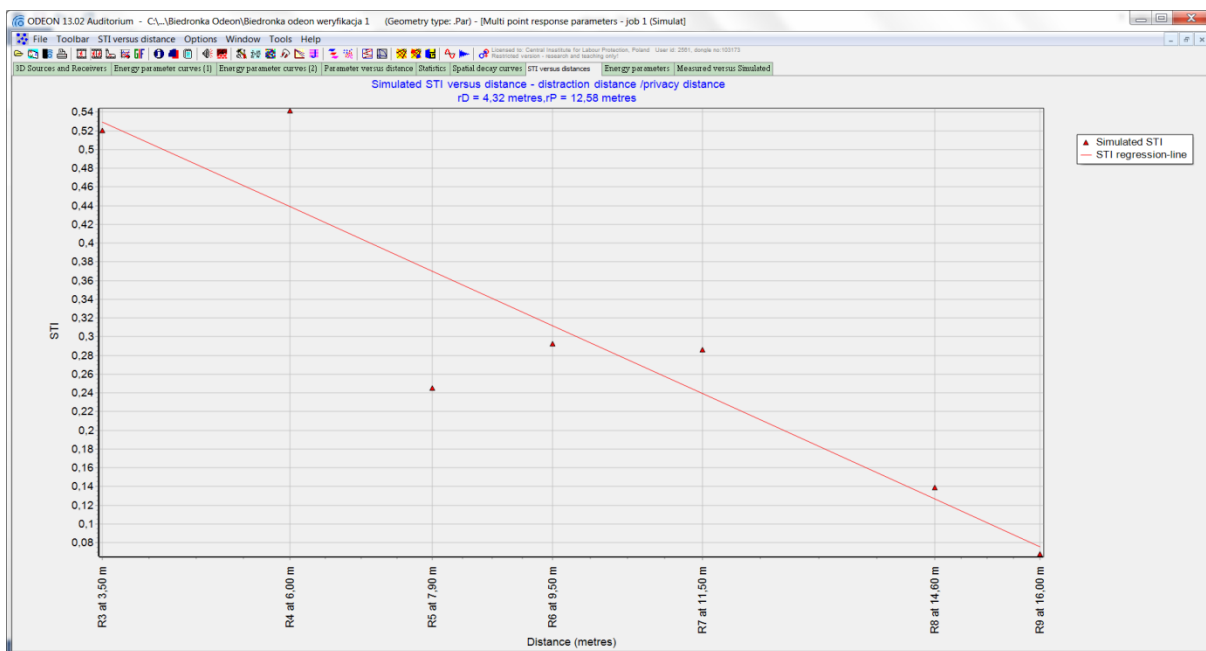
- rys. 5 - czasu pogłosu T ,
- rys. 6 – parametrów - spadku poziomu dźwięku mowy na podwojenie odległości $D_{2,S}$ oraz poziomu dźwięku A mowy w odległości 4 m od źródła $L_{p,A,S,4m}$,
- rys. 7 - odległości rozproszenia r_D .



Rys.5. Czas pogłosu pomieszczenia w funkcji częstotliwości, po adaptacji akustycznej (wyniki symulacji akustycznej; ostatni wariant adaptacji akustycznej)



Rys. 6. Poziom dźwięku A w funkcji odległości od źródła mowy, po adaptacji akustycznej (wyniki symulacji akustycznej; ostatni wariant adaptacji akustycznej)



Rys. 7. Wskaźnik transmisji mowy STI w funkcji odległości od źródła mowy, po adaptacji akustycznej (wyniki symulacji akustycznej; ostatni wariant adaptacji akustycznej)

Przedstawione wyniki obliczeń, metodą symulacji akustycznej obiektu rzeczywistego (w programie komputerowym), pozwalają stwierdzić, że jest możliwe (metodami adaptacji akustycznej pomieszczenia oraz wprowadzeniem sygnału maskującego sygnał mowy), uzyskanie odpowiednich warunków pracy w pomieszczeniach biurowych open space (warunki te określone są w PN-EN ISO 3382-3:2012 [5]).

Bibliografia

1. Mikulski W., Warmiak I.: *Wymagania akustyczne jakie powinno spełniać środowisko pracy dotyczące hałasu pod względem możliwości wykonywania pracy wymagającej koncentracji uwagi. Czynniki zagrożeń zawodowych – hałas i drgania - materiały internetowe*
http://www.ciop.pl/CIOPPortalWAR/appmanager/ciop/pl?_nfpb=true&_pageLabel=P1401037871334841682883&html_klucz=10972&html_tresc_id=10929&html_tresc_root_id=10929&html_klucz_spis=
2. Mikulski W., Warmiak I.: *Parametry i metody ich pomiaru charakteryzujące propagację dźwięku i warunki akustyczne w pomieszczeniach do pracy wymagającej koncentracji uwagi. Czynniki zagrożeń zawodowych – hałas i drgania - materiały internetowe*
www.ciop.pl
3. PN-B-02151-4:2015 „Akustyka budowlana Ochrona przed hałasem w budynkach - Część 4: Wymagania dotyczące warunków pogłosowych i zrozumiałości mowy w pomieszczeniach”.
4. PN-EN ISO 11654:1999 „Akustyka. Wyroby dźwiękochłonne używane w budownictwie. Wskaźnik pochłaniania dźwięku”.
5. PN-EN ISO 3382-3:2012 „Akustyka - Pomiar parametrów akustycznych pomieszczeń - Część 3: Pomieszczenia biurowe typu open space”.
6. PN-EN ISO 17624:2008 „Akustyka – Wytyczne dotyczące ograniczenia hałasu w biurach i pomieszczeniach pracy za pomocą ekranów akustycznych”.

Publikacja opracowana na podstawie wyników III etapu programu wieloletniego pn. „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy”, dofinansowywanego 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. Projekt nr II.P.13 Badania propagacji dźwięku i metod kształtowania warunków akustycznych w pomieszczeniach do pracy wymagającej koncentracji uwagi