

Ocena właściwości akustycznych pomieszczeń pracy nauczycieli na przykładzie wybranych szkół podstawowych

Fot. Sergej Khackimullin/Bigstockphoto



W artykule przedstawiono wyniki badań właściwości akustycznych pomieszczeń przeprowadzonych w 89 salach lekcyjnych w czterech szkołach podstawowych. Właściwości akustyczne sal lekcyjnych określano w oparciu o czas pogłosu (T), oraz obiektywne parametry zrozumiałości mowy - wskaźnik klarowności (C50) i wskaźnik transmisji mowy (STI). Stwierdzono występowanie dużego zróżnicowania tych parametrów akustycznych w salach lekcyjnych. Przeprowadzona analiza wyników badań wykazała niekorzystne warunki akustyczne w pomieszczeniach pracy nauczycieli.

Assessing room acoustics at teachers' workplaces in selected primary schools

This article presents research on the acoustic properties of 89 classrooms in four typical primary schools. Those properties were characterized with reverberation time (T), speech transmission index (STI) and clarity index (C50). The results showed a large diversity in the acoustic properties of classrooms in each school and between schools. An analysis of the results showed poor acoustic conditions at teachers' workplaces.

Wprowadzenie

Szkoły są zarówno środowiskiem pracy, jak i miejscem nauki. Według danych GUS w ok. 36 tys. polskich szkół zatrudnionych jest ok. 400 tys. nauczycieli. Niemal połowa z nich (178,4 tys.) pracuje w szkołach podstawowych [1]. Badania prowadzone przez różne ośrodki badawcze wykazały niekorzystny stan warunków akustycznych w polskich szkołach [2, 3].

Wysokie poziomy hałasu występujące w pomieszczeniach szkolnych, zwłaszcza w szkołach podstawowych, zakłócają odbiór mowy oraz utrudniają proces nauczania i uczenia się. Tłumaczy się to m.in. niewłaściwymi rozwiązaniami architektonicznymi obiektów szkolnych, co jest przyczyną niedostatecznej izolacyjności akustycznej przegród między pomieszczeniami i nieodpowiednich właściwości akustycznych pomieszczeń.

W niniejszym artykule przedstawiono ocenę właściwości akustycznych pomieszczeń szkolnych na przykładzie czterech szkół podstawowych.

Akustyka obiektów szkolnych

Właściwe rozwiązania architektoniczne obiektów szkolnych powinny być przyjmowane na etapie projektowania. Właściwości akustyczne istniejących już pomieszczeń można również kształtować przez odpowiednie adaptacje akustyczne ścian, sufitów i podłóg oraz wyposażenie wnętrz.

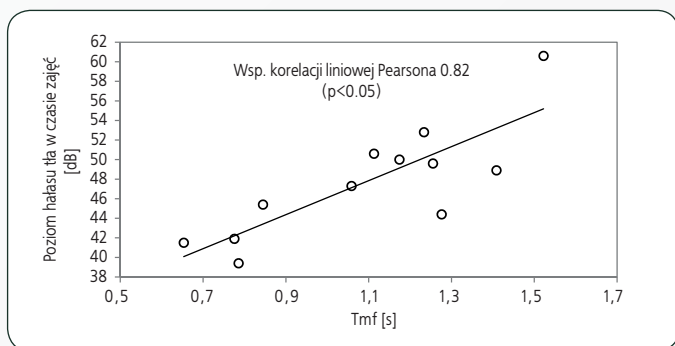
Właściwości akustyczne pomieszczenia są wypadkową jego objętości, kształtu, właściwości materiałów, z którego wykonane są powierzchnie je ograniczające oraz jego wyposażenia [4]. Można je określić m.in. na podstawie parametrów czasu pogłosu pomieszczenia (T) oraz parametrów zrozumiałości mowy – wskaźnik transmisji mowy (STI) i wskaźnik klarowności (C_{50}).

Czas pogłosu to czas, w jakim energia akustyczna maleje ze stanu ustalonego o 60 dB po wyłączeniu źródła dźwięku [5]. W praktyce czas pogłosu oblicza się z zaniku energii akustycznej o 30 dB (czas pogłosu T_{30}) lub o 20 dB (czas pogłosu T_{20}), ekstrapolując krzywą zaniku dźwięku. Parametr ten określa się z re-

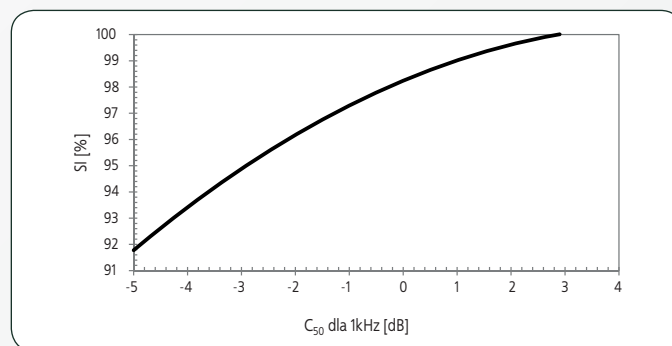
guły w oktawowych pasmach częstotliwości. Ze względu na silną korelację czasu pogłosu z wrażeniami słuchowymi, jest on jednym z najważniejszych kryteriów oceny akustyki pomieszczenia.

Badania prowadzone przez CIOP-PIB [6] wykazują istotną statystycznie korelację między poziomem hałasu tła (poziom dźwięku A tła) w czasie zajęć, a czasem pogłosu pomieszczenia (T_{mf} – uśredniony czas pogłosu z pasm częstotliwości 500 Hz, 1000 Hz i 2000 Hz). Im dłuższy jest czas pogłosu pomieszczenia, tym wyższy poziom hałasu tła (rys. 1.).

Do obiektywnej oceny zrozumiałości mowy w salach lekcyjnych służy m.in. wskaźnik klarowności C_{50} , który określa stosunek energii sygnału docierającej w czasie pierwszych 50 ms, do całkowitej jego energii (wartość 50 ms wynika ze stałej czasowej narządu słuchu). Wskaźnik C_{50} , z uwagi na silną korelację z testami subiektywnej zrozumiałości mowy [7], jest ważnym kryterium oceny akustycznej sal lekcyjnych. Podobnie jak czas pogłosu, podaje się go w oktawowych lub tercjowych pasmach częstotliwości.



Rys. 1. Zależność między czasem pogłosu T_{mf} a poziomem hałasu tła w czasie zajęć [6]
Fig. 1. Relationship between reverberation time T_{mf} and background noise during classes [6]



Rys. 2. Zależność między zrozumiałością mowy SI a wskaźnikiem klarowności C_{50} [13]
Fig. 2. Relationship between speech intelligibility SI and clarity index C_{50} [13]

Tab. 1. Zakresy wartości wskaźnika transmisji mowy STI i odpowiadające tym zakresom subiektywne odczucie zrozumiałości mowy [9,11]

Tab. 1. Ranges of values of speech transmission index STI and corresponding subjective speech clarity evaluation [9,11]

STI	0 – 0,3	0,3 – 0,45	0,45 – 0,6	0,60 – 0,75	0,75 – 1,0
Subiektywne odczucie zrozumiałości mowy	Brak zrozumiałości	Słaba	Dostateczna	Dobra	Znakomita

Tab. 2. Dopuszczalne wartości czasu pogłosu i wskaźnika transmisji mowy w szkołach podstawowych

Tab. 2. Admissible values of reverberation time and speech transmission index (STI) in primary school classrooms

Kraj	Dokument	Czas pogłosu [s]	STI
Francja	Dekret 1995	0,4-0,8	–
Holandia	Wytyczne NEN 5077	0,8	–
Szwecja	Norma SS025268	0,5-0,6	–
Norwegia	Norma NS 8175	0,6	–
Portugalia	Norma NBR 12179, 1992	0,6-0,8 (250-4000 Hz) 1 (125-250 Hz)	–
USA	Norma ANSI S.12.60	$T_{mf} < 0,6$ (dla $V < 283 \text{ m}^3$) $T_{mf} < 0,7$ (dla $V > 283 \text{ m}^3$ i $V \leq 566 \text{ m}^3$)	–
Wielka Brytania	Wytyczne BB93	$T_{mf} < 0,6$ szkoła podstawowa $T_{mf} < 0,8$ szkoła średnia	$STI \geq 0,6$
Australia i Nowa Zelandia	Norma AS/NZS 2107	$T_{mf} < 0,4-0,5$	–
Finlandia	Norma SFS 5907:en	0,6-0,8 (w zakresie 250 – 4000 Hz) o 50% wyższy dla 125 Hz	Klasa A i B: $STI \geq 0,8$ Klasa C: $STI \geq 0,7$

Tab. 3. Zalecane wartości czasów pogłosu wg projektu normy prPN-B-02151-4 [14]

Tab. 3. Recommended values for reverberation time T in classrooms according to draft Polish standard prPN-B-02151-4 [14]

Rodzaj pomieszczenia	Optymalny czas pogłosu T_{opt} [s]	Zakres tolerancji czasu pogłosu T
Klasy szkolne (o objętości 30 - 1000 m^3)	$T_{opt} = 0,32 \lg V - 0,17$	125 i 4000 Hz: T/T_{opt} w zakresie od 0,65 do 1,2 250, 500, 1000 i 2000 Hz: T/T_{opt} w zakresie od 0,8 do 1,2 Dla sal do nauki języków obcych: $T < 80\% T_{opt}$

Wskaźnik transmisji mowy STI (Speech Transmission Index) jest kolejnym parametrem służącym do obiektywnej oceny zrozumiałości mowy w salach lekcyjnych, który łączy takie elementy, jak poziom sygnału mowy, odpowiedź częstotliwościowa kanału komunikacji słownej, zniekształcenia nieliniowe, poziom tła akustycznego, czas pogłosu, echa oraz maskowanie dźwięku [8]. Podaje się go jako jednoczłonową wartość z zakresu 0-1.

Kryteria oceny sal lekcyjnych

W Polsce nie ma obecnie kryteriów oceny sal lekcyjnych w oparciu o wymienione parametry (również pod kątem oceny stanowisk pracy nauczycieli). Nie oznacza to, że obecny stan tych pomieszczeń jest zadowalający. Wynika to z wielu czynników, m.in. braku odpowiednich przepisów, niedostatku wiedzy oraz

niewystarczających środków finansowych. W celu oceny stanu pomieszczeń szkolnych w artykule posłużono się kryteriami zagranicznymi oraz projektem polskiej normy [14].

Większość zaleceń lub wymagań (w tym również prPN-B-02151-4) dotyczy czasu pogłosu, izolacyjności przegród oraz poziomów tła akustycznego w pustych pomieszczeniach. W niektórych krajach określa się dodatkowo wymagania dotyczące zrozumiałości mowy, za pomocą takich parametrów, jak wskaźnik transmisji mowy STI [9] oraz wskaźnik klarowności C_{50} [7]. W brytyjskich wytycznych BB93 [10] minimalna wartość wskaźnika STI w odniesieniu do sal lekcyjnych wynosi 0,6. Odpowiada to subiektywnej zrozumiałości mowy określonej wg PN-EN ISO 9921 [9] lub PN-EN ISO 60268-16 [11] jako zrozumiałość dobra (tab. 1). Fińskie zalecenia ujęte w normie SFS 5907 [12] dla zapewnienia wysokiej jakości akustycznej sal lekcyjnych podają minimalną wartość wskaźnika STI jako 0,80 (zrozumiałość znakomita wg [9] i [11]).

W przypadku wskaźnika C_{50} zalecaną minimalną jego wartość w odniesieniu do pomieszczeń związanych z przekazem słownym zaproponował Bradley jako 1 dB dla 1 kHz [7]. Ponieważ wartość tego wskaźnika jest w dużo silniejszym stopniu skorelowana z subiektywną zrozumiałością mowy SI (*Speech Intelligibility*) [13] niż czasu pogłosu i wskaźnik STI, w ostatnim czasie wskaźnik ten zaczyna być coraz częściej stosowany. Zależność tę przedstawiono na rys. 2. Kryterium oceny sal lekcyjnych wg C_{50} w paśmie częstotliwości 1 kHz odpowiada subiektywnej zrozumiałości mowy SI na poziomie 99% (rys. 2.).

Zalecane wartości czasu pogłosu, stosowane w różnych krajach, zawierają się w granicach 0,4 – 0,8 s, w zależności od przeznaczenia sali, jej objętości oraz częstotliwości (tab. 2.).

Zalecenia dotyczące czasu pogłosu w salach lekcyjnych w Polsce określa projekt prPN-B-02151-4 (tab. 3.), [14]. Dla rozpatrywanych sal lekcyjnych maksymalna dopuszczalna wartość czasu pogłosu T_{30} dla częstotliwości 1 kHz wynosi 0,65 s. Kryteria prPN-B-02151-4

Tab. 4. Wyniki pomiarów wskaźnika wyrazistości C_{50} oraz czasu pogłosu T_{30} (1 kHz) w badanych salach lekcyjnych
 Tab. 4. Measurement results for clarity index C_{50} and reverberation time T_{30} (1 kHz) in classrooms

Szkoła	Liczba sal lekcyjnych	Wskaźnik klarowności C_{50} dla 1 kHz [dB]		Procent sal spełniających kryteria C_{50}^*	Czas pogłosu T_{30} dla 1 kHz [s]		Procent sal spełniających kryteria T_{30}^{**}
		Max	Min		Min	Max	
SP1	20	5,7	-3,2	37%	0,53	1,67	5%
SP2	29	2,4	-3,2	24%	0,82	1,33	0%
SP3	23	1,5	-4,2	4%	0,83	1,75	0%
SP4	17	1,5	-1,4	6%	0,79	1,33	0%

* wg Bradley'a [7]

** wg prPN-B-02151-4 [14] oraz BB93 [10]

Tab. 5. Wyniki pomiarów wskaźnika transmisji mowy STI w badanych salach lekcyjnych
 Tab. 5. Measurement results of speech transmission index STI in classrooms

Szkoła	Liczba sal lekcyjnych	Wskaźnik transmisji mowy STI [-]		Procent sal spełniających kryteria BB93 [10]	Procent sal spełniających kryteria SFS 5907 [12]
		Min	Max		
SP1	20	0,61	0,74	75%	0%
SP2	29	0,55	0,66	52%	0%
SP3	23	0,53	0,65	17%	0%
SP4	17	0,60	0,72	100%	0%

odnoszą się do pomieszczeń z pełnym wyposażeniem, przy 100% wypełnieniu ludźmi przewidzianym dla danego pomieszczenia w warunkach normalnego użytkowania. Różnice między czasem pogłosu w pustych i wypełnionych pomieszczeniach nie przekraczają 10% i nie wpływają na ocenę tych pomieszczeń [15].

Badania właściwości akustycznych sal lekcyjnych

Dotychczas w Polsce nie rozpatrywano właściwości akustycznych sal lekcyjnych jako elementu mającego zasadniczy wpływ na warunki pracy nauczycieli. Jednocześnie dowiedzione jest, że warunki te wpływają na zagrożenie hałasem oraz nadmierny wysiłek głosowy nauczycieli. W Centralnym Instytucie Ochrony Pracy – Państwowym Instytucie Badawczym od kilku lat prowadzone są badania akustyki

tych pomieszczeń. W artykule podsumowano wyniki przeprowadzonych badań właściwości akustycznych 89 sal lekcyjnych w 4 szkołach podstawowych (rok budowy: SP1 – 1973 r., SP2 – 2003 r., SP3 – 1993 r. i SP4 – 1981 r.). Aby odzwierciedlić rzeczywistą zmienność pomiędzy obiektami, do badań wybrano szkoły, które różniły się pod względem: wielkości (kubatury), budowy, wykończenia, wyposażenia, usytuowania w środowisku zewnętrznym oraz liczby uczęszczających do nich uczniów.

Pomiary akustyczne przeprowadzono w pomieszczeniach metodą impulsową, z użyciem pseudolosowego sygnału MLS, która oparta jest na pomiarze odpowiedzi impulsowej pomieszczenia i wyznaczeniu na jej podstawie badanych wielkości. Badania przeprowadzono w wykończonych, umeblowanych pomieszczeniach, bez obecności uczniów.

Wielkościami mierzonymi były:

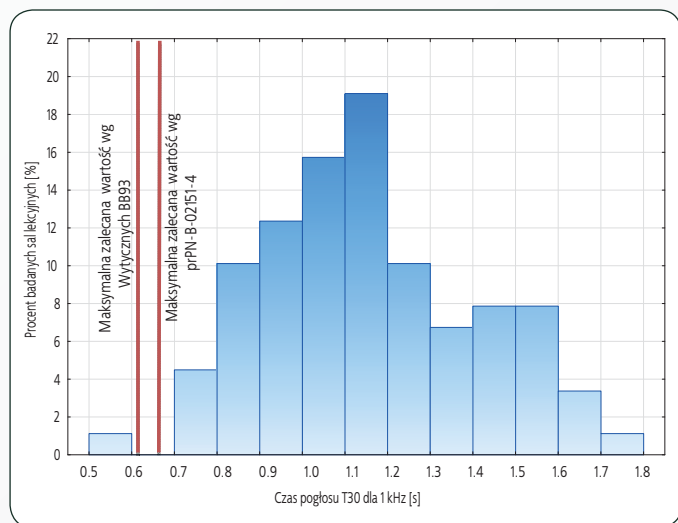
- czas pogłosu w oktaowych pasmach częstotliwości 125-4000 Hz
- parametry charakteryzujące zrozumiałość mowy: wskaźnik C_{50} w oktaowych pasmach częstotliwości 125-4000 Hz oraz wskaźnik transmisji mowy STI.

Wyniki pomiarów czasu pogłosu T_{30} , wskaźnika klarowności C_{50} oraz wskaźnika transmisji mowy STI przedstawiono na rys. 3-5. oraz w tab. 4. i 5. Przy ocenie sal lekcyjnych przy pomocy wskaźnika STI należy wziąć pod uwagę fakt, że wraz ze wzrostem hałasu tła maleje jego wartość. Minimalny odstęp sygnału mowy od tła akustycznego, który nie wpływa na wynik pomiaru STI wynosi 15 dB dla każdego z badanych pasm oktaowych.

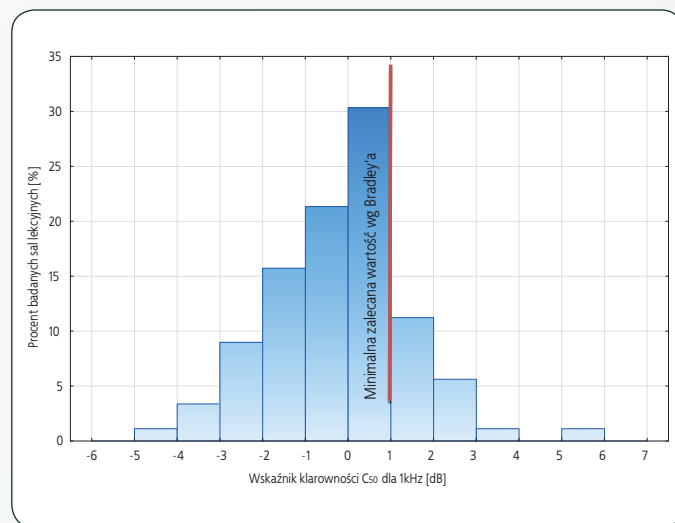
Wartości wskaźnika C_{50} oraz czasu pogłosu T_{30} wyznaczano w salach lekcyjnych w oktaowych pasmach częstotliwości w zakresie 125-4000 Hz, jednak z uwagi na duże wartości korelacji z subiektywnymi testami [15, 16] oraz wymienionymi wcześniej kryteriami oceny wyniki podano w paśmie częstotliwości 1 kHz.

Wyniki badań wskazują na nieodpowiednie właściwości akustyczne sal lekcyjnych, w których pracują nauczyciele, w szczególności:

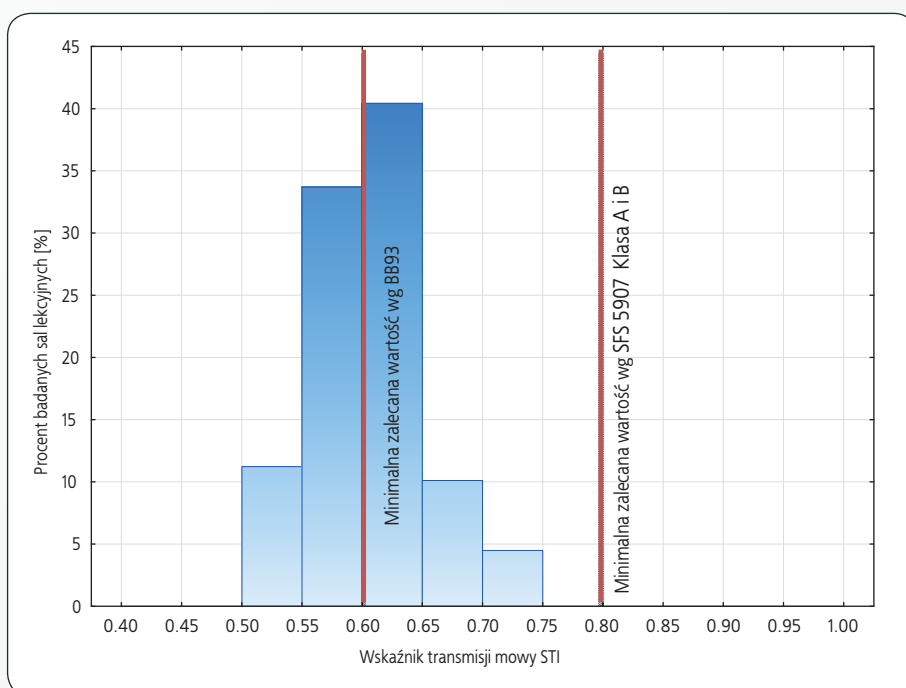
- zalecenia dotyczące czasu pogłosu pomieszczeń dla 1 kHz zawarte w projekcie PN-B-02151-4, czy w wytycznych BB93 spełniało jedynie 1% badanych sal lekcyjnych
- kryterium dotyczące wskaźnika klarowności C_{50} dla 1 kHz zaproponowane przez Bradleya spełniało 24% wszystkich badanych sal lekcyjnych (przy założeniu, że odstęp sygnału mowy od szumu wynosi co najmniej 30 dB)
- zalecenia dla wskaźnika transmisji mowy STI ujęte w brytyjskich BB93 spełniało 57% badanych sal lekcyjnych (przy założeniu, że odstęp sygnału mowy od szumu wynosi co najmniej 15 dB w każdym z badanych pasm oktaowych), natomiast żadne z badanych



Rys. 3. Rozkład czasu pogłosu T_{30} (1 kHz) w badanych salach lekcyjnych
 Fig. 3. Distribution of reverberation time T_{30} (1 kHz) in classrooms



Rys. 4. Rozkład wskaźnika klarowności C_{50} (1 kHz) w badanych salach lekcyjnych
 Fig. 4. Distribution of clarity index C_{50} (1 kHz) in researched classrooms



Rys. 5. Rozkład wskaźnika transmisji mowy STI w badanych salach lekcyjnych

Fig. 5. Distribution of speech transmission index STI in researched classrooms

pomieszczeń nie spełniało wymagań normy fińskiej.

Badania wykazały, że w większości przypadków pomieszczenia szkolne nie stwarzają odpowiedniego klimatu do pracy i nauki. Zbyt duże wartości czasu pogłosu w badanych pomieszczeniach są ich wadą akustyczną wynikającą najczęściej z niewłaściwej geometrii i adaptacji przekładają się na dudnienie dźwięku oraz wzrost tła akustycznego. Powoduje to spadek zrozumiałości mowy nauczyciela (rejestrowany także zmniejszonymi wartościami wskaźnika transmisji mowy STI i wskaźnika klarowności C_{50}) oraz nieświadomego podnoszenia głosu przez nauczyciela.

Wartości tych parametrów wskazują na nieodpowiednie wykończenie sal i niewłaściwe ich wyposażenie. Warunki te można poprawić, zwiększając chłonność akustyczną pomieszczeń (m.in. przez właściwe zaprojektowanie pokrycia ścian i sufitu materiałami dźwiękochłonnymi oraz zastosowanie wyposażenia pomieszczeń o dużej chłonności akustycznej).

Podsumowanie

Oceny sal lekcyjnych dokonano w odniesieniu do czasu pogłosu, który wpływa m.in. na poziom tła akustycznego oraz w odniesieniu do parametrów zrozumiałości mowy – wskaźnika transmisji mowy oraz wskaźnika klarowności.

Ocena rozpatrywanych pomieszczeń na podstawie badań czasu pogłosu wykazała, że tylko 1% pomieszczeń spełnia kryteria określone w projekcie polskiej normy. Zapewnienie

optymalnego czasu pogłosu w salach lekcyjnych nie tylko wpływa na poprawę zrozumiałości mowy, ale przede wszystkim obniża poziom tła akustycznego w czasie prowadzenia zajęć. Wysoki poziom tła akustycznego w salach lekcyjnych wpływa bezpośrednio na poziom ciśnienia akustycznego mowy nauczyciela (efekt Lombarda). Prowadzi to do zwiększonego wysiłku głosowego nauczycieli, co może być przyczyną choroby zawodowej – przewlekłych chorób narządu głosu spowodowanych nadmiernym wysiłkiem głosowym (trwającym co najmniej 15 lat).

Ocena rozpatrywanych pomieszczeń pod kątem zrozumiałości mowy wykazała, że 57% pomieszczeń spełnia kryteria BB93 (brytyjskie wytyczne) dotyczące wskaźnika transmisji mowy STI, natomiast żadne z nich nie spełnia kryteriów fińskiej normy.

Ocena rozpatrywanych pomieszczeń na podstawie badań wskaźnika klarowności C_{50} wykazała, że 24% pomieszczeń spełnia kryterium Bradley'a.

Różnice w ocenie sal lekcyjnych w odniesieniu do zrozumiałości mowy wynikają m.in. ze skali wskaźnika transmisji mowy STI – zakres tego parametru odpowiadający zrozumiałości „dobrej” wynosi 0,6 – 0,8. Natomiast wg kryterium Bradley'a jest to jedna wartość progowa i na podstawie obecnego stanu wiedzy nie można jednoznacznie określić zależności pomiędzy tymi dwoma parametrami.

Przeprowadzona ocena sal lekcyjnych nie jest identyczna wg parametru czasu pogłosu oraz parametrów zrozumiałości mowy.

Wynika to z faktu, że parametry te, ze względu na swoją specyfikę, określają inne zjawiska. Łączne ich uwzględnienie umożliwi pełniejszą ocenę tego typu pomieszczeń. Z drugiej strony wyniki badań mogą świadczyć o tym, że kryteria dotyczące czasu pogłosu są zbyt rygorystyczne i wymagają analizy popartej subiektywnymi testami.

Autorzy kontynuują badania właściwości akustycznych sal lekcyjnych w zakresie opracowania metod oceny pomieszczeń dydaktycznych w aspekcie poprawy warunków pracy.

PIŚMIENNICTWO

[1] Oświata i wychowanie w roku szkolnym 2009/2010, GUS 2010

[2] D. Augustyńska, A. Kaczmarska, W. Mikulski, J. Radosz *Ocena narażenia na hałas nauczycieli na przykładzie 3 szkół podstawowych w Warszawie*. „Bezpieczeństwo Pracy” nr 2 (485) 2012

[3] D. Augustyńska, J. Radosz *Hałas w szkołach (1) – przegląd badań*. „Bezpieczeństwo Pracy” nr 9 (456) 2009

[4] W. Mikulski, J. Radosz *Wpływ objętości i wyposażenia na właściwości akustyczne sal lekcyjnych*. Materiały konferencyjne – Noise Control 2010, Książ, 06-09.06.2010 r.

[5] PN-EN ISO 3382-1:2009 Akustyka – Pomiar parametrów akustycznych pomieszczeń – Część 1: Pomieszczenia specjalne

[6] Ocena akustyczna pomieszczeń dydaktycznych przy niepełnej informacji o parametrach akustycznych z zastosowaniem metody SVD, I etap projektu realizowanego w ramach programu wieloletniego pn. „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy”, CIOP-PIB 2011

[7] J. S. Bradley *Predictors of speech intelligibility in rooms*. „Journal of the Acoustical Society of America” 80 (3), 837-845, 1986

[8] Z. Engel, J. Engel, K. Kosala, J. Sadowski *Podstawy akustyki obiektów sakralnych*. WITE-PIB, Kraków-Radom, 2007

[9] PN-EN ISO 9921:2005 Ergonomia – Ocena porozumiewania się mową

[10] „Building Bulletin 93” – *School Acoustics*

[11] PN-EN 60268-16:2011 Urządzenia systemów elektroakustycznych – Część 16: Obiektywna ocena zrozumiałości mowy za pomocą wskaźnika transmisji mowy.

[12] SFS 5907:en Acoustics classification of spaces in buildings

[13] J. S. Bradley, S. R. Bistafa *Relating speech intelligibility to useful-to-detrimental sound ratios*. „Journal of the Acoustical Society of America”, 112 (1), 27-29, 2002

[14] Warunki techniczne jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie – tekst ujednolicony po nowelizacji z komentarzem. Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa 2009

[15] H. Sato, J. S. Bradley *Evaluation of acoustical conditions for speech communication in working elementary school classrooms*. „Journal of the Acoustical Society of America” 123 (4), 2064-2077, 2008

[16] H. Sato, M. Morimoto, M. Wada *Relationship between listening difficulty and acoustical objective measures in reverberant sound fields*. „Journal of the Acoustical Society of America”, 123 (4), 2087-2093, 2008

Publikacja opracowana na podstawie wyników II etapu programu wieloletniego pn. „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy”, finansowanego w latach 2011-2013 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.