



KONCEPCJA KLIMATU AKUSTYCZNEGO W KLASACH SZKOLNYCH

Conception of the acoustical climate in classrooms

Andrzej Ossowski, Julia Smirnowa

Institut Podstawowych Problemów Techniki, PAN
00-049 Warszawa, ul Świątokrzyska 21
aossow@ippt.gov.pl; julsmir@ippt.gov.pl

STRESZCZENIE

W pracy przedstawiono koncepcję klimatu akustycznego klas szkolnych jako pełnego zestawu niezależnych wskaźników akustycznych (fizycznych), określających własności użytkowe klas. Wykorzystując pojęcia użytecznego i nieużytecznego sygnału mowy oraz zakładając zlokalizowane położenia źródła mowy i źródeł hałasu, zdefiniowano podstawowe wskaźniki takie jak: *wzmocnienie hałasu*, *wzmocnienie mowy*, *czystość mowy* oraz *stosunek sygnału do szumu*. Podano formuły obliczania wskaźników klimatycznych, obowiązujące w przybliżeniu akustyki geometrycznej oraz przy założeniu liniowości klas szkolnych jako obiektów fizycznych.

1. WSTĘP

Liczne badania psychologiczne i psychoakustyczne uzasadniają przypuszczenie o wpływie akustycznych własności klas szkolnych na samopoczucie nauczycieli i uczniów oraz na efekty nauczania a w duży czas pogłosu są czynnikami niekorzystnymi, jeżeli chodzi o własności użytkowe klasy [1]. Okazało się również, że adaptacja akustyczna klas za pomocą sufitów podwieszanych może poprawić zrozumiałość mowy w klasach o względnie wysokim poziomie hałasu tła [1]. Mimo tych obserwacji nie znaleziono jak dotąd wyraźnych korelacji między wynikami psychoakustycznych testów słownych a fizycznymi parametrami klas takimi jak: czas pogłosu, C_{50} czy STI [2]. Z wymienionych względów nie jest łatwo przewidzieć bez badań psychologicznych, jakie są faktycznie własności użytkowe danej klasy a tym bardziej jak zmieniają się te własności po zastosowaniu określonej adaptacji za pomocą materiałów dźwiękochłonnych. Wydaje się, że problem relacji między fizycznymi a psychoakustycznymi własnościami klas szkolnych jest nieco bardziej złożony niż można by sądzić i wymaga zastosowania całego zestawu odpowiednich wskaźników akustycznych, określających tzw. klimat akustyczny w klasach. Podstawowym celem niniejszej pracy jest przedstawienie pewnej koncepcji klimatu akustycznego w klasach szkolnych.

2. WYMAGANIA UŻYTKOWE STAWIANE KLASOM SZKOLNYM

Klasa szkolna, jako pomieszczenie ograniczone ścianami, sufitem i podłogą, cechuje się ustalonym układem ławek przeznaczonych dla uczniów lub studentów oraz wyznaczonym miejscem dla nauczyciela. Z kolei, w sensie użytkowym, każda klasa służy konkretnym celom dydaktycznym, które najogólniej można by określić jako: osiągnięcie możliwie dobrych wyników nauczania. Dla efektywnej realizacji tych celów stawia się klasom pewne wymagania użytkowe, które odgrywają istotną rolę.

Przede wszystkim należy w klasie zapewnić swobodę przestrzenną osób uczących się. Powinny być, więc zachowane odpowiednie odległości między uczniami oraz dostateczna kubatura pomieszczenia. Tego typu wymagania zaliczają się do wymagań architektonicznych, które w istocie rzeczy można sprowadzić do wymiarów i relacji geometrycznych takich jak: bezwzględne rozmiary pomieszczeń, liczba miejsc uczniowskich przypadająca na jednostkę powierzchni, odległości między ławkami uczniów, odległość ławek od nauczyciela itp. Wspomniane wyżej wymagania będziemy traktowali jako dane wejściowe, które muszą być spełnione. Ograniczając rozważania do najbardziej typowych sytuacji, będziemy rozpatrywali dalej klasy prostopadłościenne, typowych rozmiarów i liczbie ławek stosownej do powierzchni klasy.

W stosunku do klas o ustalonych parametrach architektonicznych można postawić dalsze wymagania zupełnie innej natury, mianowicie wymagania związane bezpośrednio z własnościami akustycznymi klasy. Najłatwiej jest wyrazić te wymagania w sposób jakościowy. Dla uczniów i nauczyciela w klasie powinna być zapewniona dobra słyszalność i zrozumiałość mowy oraz możliwie niski poziom szumu tła. Proces nauczania powinien być efektywny a zmęczenie uczniów - w jak najmniejszym stopniu potęgowany akustyką klasy.

Podane własności użytkowe klas są naturalne i intuicyjnie zrozumiałe. Trudno jest jednak wskazać obiektywne (ilościowe) wskaźniki oceny jakości danej klasy ze względu na tak określone własności użytkowe. Nie wiadomo, bowiem dokładnie jak wyrazić takie wymagania poprzez parametry fizyczne klas, które, prócz relacji geometrycznych, określają również własności akustyczne powierzchni ograniczających (ścian, sufitu i podłogi). Dlatego podstawowe zagadnienie akustyki klas szkolnych polega na znalezieniu obiektywnych wskaźników, które korelowałyby ze wskaźnikami subiektywnymi i umożliwiały ocenę jakości akustycznej klasy na podstawie pomiarów i/lub obliczeń na modelu fizycznym. Zadanie to jak dotąd nie zostało rozwiązane w sposób zadawalający.

3. OBIEKTYWNE WSKAŹNIKI OCENY JAKOŚCI KLAS

Najbardziej oczywistym sposobem obiektywizacji wymagań użytkowych klas jest przeprowadzenie w klasach odpowiednich testów psychologicznych na grupach uczniów. Jeżeli przyjmiemy, że np. istotnym walorem użytkowym klasy jest zrozumiałość mowy, wówczas dobrym miernikiem oceny jakości klasy mogą być wyniki testów na zrozumiałość mowy [2,3]. Wyniki takie, wprawdzie obiektywne, mają jednak charakter statystyczny i są obciążone dużymi błędami. Dzieje się tak dlatego, iż na zrozumiałość mowy mają wpływ nie tylko własności akustyczne klasy. Poważną wadą klasycznych testów na zrozumiałość mowy jest również ich duża pracochłonność. Podobnie, wyniki badań mających na celu określenie wpływu szumu na zdolności percepcyjne, manualne i psychomotoryczne uczniów i dorosłych, badanych w warunkach naturalnych i laboratoryjnych są często kontrowersyjne i niejednoznaczne [4]. Poza tym, metodą testów trudno jest dokonać predykcji własności akustycznych klasy będącej na etapie projektowania.

Z wymienionych wyżej względów rozpatruje się różne wskaźniki fizyczne opisujące własności akustycznych klas w nadziei, że będą one korelowały z wynikami testów psychologicznych. Przeważnie, mówiąc o własnościach użytkowych klasy ma się na myśli zrozumiałość mowy, którą uważa się za podstawowy czynnik warunkujący efektywność nauczania. Z tego względu w literaturze dotyczącej akustyki pomieszczeń rozważa się takie wskaźniki fizyczne jak: czas pogłosu, jasność mowy (C_{50}), poziom szumu tła, stosunek sygnału do szumu, U_{50} , wskaźnik transmisji mowy (STI), gdyż uważa się, że właśnie te wielkości odgrywają istotną rolę w procesie percepcji i rozumienia mowy. Ponieważ technika pomiarowa oraz metody wyznaczania ww. wskaźników są szczegółowo opracowane, celowe byłoby zastosowanie tych wskaźników do oceny jakości akustycznej klas szkolnych. Dane literaturowe świadczą jednak o braku jednoznacznej, wyraźnej korelacji wartości tych wskaźników z wynikami testów na zrozumiałość mowy. Wydaje się, że żaden z obiektywnych wskaźników opisanych w literaturze nie jest wystarczający do oceny jakości klasy pod względem zrozumiałości mowy.

4. OGÓLNA KONCEPCJA KLIMATU AKUSTYCZNEGO W KLASACH

Klasy są pomieszczeniami szkolnymi, które mogą być wykorzystywane do różnych celów dydaktycznych. Klasy specjalistyczne oraz klasy uniwersalne powinny być oceniane ze względu na różne wskaźniki jakości. Odmierna jest, bowiem hierarchia ważności różnych własności użytkowych klas dla realizacji różnych celów dydaktycznych. Istnieje, zatem potrzeba znalezienia takich obiektywnych wskaźników akustycznych, które porządkowałyby klasy pod względem stopnia (jakości) spełnienia określonych celów dydaktycznych. Znajomość takich wskaźników umożliwiłaby optymalną modyfikację akustyczną istniejących klas oraz projektowanie klas nowych.

Posługując się analogią z pojęciem klimatu stosowanego w geografii czy meteorologii, dogodnie jest wprowadzić w akustyce klas następującą definicję:

Klimat akustyczny klas szkolnych - zestaw obiektywnych wskaźników Q_1, Q_2, \dots, Q_m fizycznych i akustycznych (wyznaczanych na podstawie wyników pomiarów i obliczeń), które w pełni określają istotne własności akustyczne oraz własności użytkowe klas.

Wskaźniki takie będziemy nazywali wskaźnikami klimatu akustycznego klasy. Podana definicja klimatu akustycznego jest intuicyjnie zrozumiała, ale mało precyzyjna. Dlatego konieczne jest uściślenie zawartych w niej, jakościowych stwierdzeń. Mianowicie, aby dany zestaw wskaźników $\{Q_1, Q_2, \dots, Q_m\}$ opisywał klimat akustyczny klas, wskaźniki te powinny spełniać następujące warunki:

Obiektywność oznaczająca możliwość ścisłego wyznaczenia każdego ze wskaźników na podstawie obliczeń teoretycznych i/lub wyników pomiarów fizycznych tj. bez udziału czynników psychologicznych czy psychoakustycznych.

Prostota wymagająca, aby każdy ze wskaźników klimatycznych miał jasną i bezpośrednią interpretację fizyczną (akustyczną) i nie był funkcją zależną od jeszcze prostszych wskaźników.

Niezależność wymagająca, aby wskaźniki klimatyczne były od siebie niezależne.

Istotność wymagająca, aby dla każdego ze wskaźników klimatycznych istniało choćby jakościowe (fizyczne lub psychologiczne) uzasadnienie jego możliwego wpływu na użytkowe własności klas a na zrozumiałość mowy w szczególności.

Zupełność wymagająca, aby wszystkie interesujące nas własności użytkowe klas (a więc wszystkie istotne przeznaczenia klas) dały się przynajmniej jakościowo wyrazić w języku wskaźników klimatycznych i aby dla każdego przeznaczenia klasy, wymagania stawiane wskaźnikom klimatycznym były specyficzne.

Warunek *obiektywności* jest oczywisty. Jednak pozostałe cztery warunki nakładane na wskaźniki klimatyczne wymagają pewnego komentarza. Po pierwsze, ponieważ w akustyce klas istotne są własności samej klasy jako obiektu fizycznego (akustycznego) oraz własności źródeł mowy i hałasu, to każdy wskaźnik klimatyczny powinien charakteryzować albo jakąś własność klasy, albo własność jakiegoś źródła dźwięku. Wskaźników nie spełniających tego wymogu nie można by uznać za proste. *Prostota* oznacza, bowiem, że każdy wskaźnik klimatyczny powinien być wynikiem jakiejś jednej przyczyny. Z kolei *niezależność* wyklucza możliwość wyliczenia któregoś ze wskaźników klimatycznych na podstawie znajomości pozostałych wskaźników. Nie ma, bowiem sensu wprowadzać do definicji klimatu nadmiarowych wskaźników. Nie oznacza to jednak, że wartości jednych wskaźników klimatycznych nie mogą być powiązane z wartościami innych wskaźników. Jeżeli zaś chodzi o *istotność*, to należy rozumieć ją jako możliwość wskazania dla każdego przeznaczenia klasy tych wskaźników klimatycznych, które powinny być możliwie duże (małe) oraz tych, które nie mają większego znaczenia. Wreszcie *zupełność* zestawu wskaźników klimatycznych zapewnia, że wskazania odnośnie tych wskaźników różnią się dla klas o różnym przeznaczeniu choćby w jednym szczególe. *Zupełność* powinna również gwarantować możliwość uszeregowania klas o jednakowym przeznaczeniu wg ich jakości użytkowej.

5. WSKAŹNIKI KLIMATU AKUSTYCZNEGO KLAS SZKOLNYCH

Efekty nauczania w klasach zależą od wiele czynników zarówno natury fizycznej jak i psychologicznej. Chcąc dobrać odpowiedni zestaw wskaźników klimatu akustycznego klas [5], należy przede wszystkim wziąć pod uwagę następujące czynniki:

- własności źródła mowy (poziom mowy w miejscu emisji, położenie źródła mowy oraz jego charakterystyka kierunkowa i częstotliwościowa),
- własności źródeł hałasu w klasie (poziom tła, poziom hałasu w miejscu emisji, widmo, kierunkowość)
- własności klasy jako obiektu fizycznego, transmitującego sygnały mowy i hałasu,
- własności słuchacza (potencjalne możliwości percepcyjne układu słuchowego człowieka w obecności hałasu, koncentracja uwagi ucznia, inne czynniki nieakustyczne oddziałujące na ucznia).

które w oczywisty sposób mogą wywierać wpływ na efekty nauczania i zrozumiałość mowy.

Zacznijmy od określenia wskaźników klimatycznych, opisujących własności samych klas. Aby tego dokonać, musimy uwzględnić pewne fakty wynikające z badań psychoakustycznych. W pomieszczeniach zamkniętych sygnały akustyczne, docierające do jakiegoś punktu, wysłane ze źródła położonego w innym punkcie są superpozycją sygnału bezpośredniego oraz sygnałów odbitych. Sygnały odbite docierają do punktu odbioru z różnymi opóźnieniami i różną intensywnością. Z badań psychoakustycznych wynika, że sygnały mowy o niewielkim opóźnieniu (poniżej 20 ms) przyczyniają się do wzrostu percypowanej głośności sygnału mowy. Sygnały mowy o większych opóźnieniach

(do 40-50ms) również w pewnym stopniu podnoszą głośność sygnału, ale jednocześnie, w zależności od poziomu, mogą wywoływać wrażenie echa utrudniające rozumienie mowy. Przy opóźnieniach jeszcze większych (powyżej pewnej wartości krytycznej, odpowiadającej średniemu czasowi trwania fonemów typowej mowy tj. około 40-50 ms) sygnały mowy nie są już percypowane jako użyteczne, lecz jako zakłócenie. Dlatego przy opisie percepcji sygnału mowy w klasie należy podzielić sygnał mowy na część użyteczną (niosącą informację) i część nieużyteczną. Podane fakty uzasadniają wprowadzenie następujących wskaźników określających transmisję mowy w klasach:

wzmocnienie mowy (SA) = stosunek energii użytecznego sygnału mowy do energii sygnału bezpośredniego;

czystość mowy (SU) = stosunek energii użytecznej części sygnału mowy do energii części nieużytecznej

Jak widać, wskaźnik SA określa jaki relatywny wkład do energii sygnału użytecznego wnosi klasa jako obiekt fizyczny poprzez superpozycję sygnału bezpośredniego z sygnałami odbitymi. Zatem im większe jest wzmocnienie mowy w klasie tym większy jest poziom sygnału użytecznego. Z kolei czystość mowy SU jest stosunkiem sygnału do szumu w klasie, gdy szumem jest po prostu superpozycja sygnałów nieużytecznych. Wskaźnik SU wyrażony w dB jest parametrem znanym w akustyce klas jako *jasność* C_{50} . Trzeba zaznaczyć, że wszystkie procesy transmisji mowy są tu szacowane dla poszczególnych fragmentów mowy, których czas trwania jest w przybliżeniu równy średniemu czasowi trwania fonemu. Wielkością opisującą ten proces jest energia fali akustycznej, która dociera do miejsca słuchacza w ciągu tego odcinka czasu. Energia użyteczna jest więc sumaryczną energią pochodzącą z danego fonemu sygnału bezpośredniego i sygnałów odbitych, które docierają do danego punktu klasy z opóźnieniami nie większymi niż 50 ms w stosunku do sygnału bezpośredniego. Z kolei energia nieużyteczna jest superpozycją energii sygnałów odbitych, które docierają w czasie trwania danego fonemu i pochodzą z wcześniejszych fonemów oraz sygnałów, które docierają do miejsca słuchacza z opóźnieniami większymi niż 50 ms.

Zupełnie analogicznie możemy zdefiniować wskaźnik określający transmisję hałasu w kasach. W przypadku hałasu emitowanego ze skoncentrowanego źródła sygnał bezpośredni i sygnały odbite są oczywiście nieużyteczne. Energię hałasu należy również określić w czasie trwania fonemu. Zatem relatywny udział klasy jako obiektu fizycznego w wypadkowej energii hałasu można opisać poprzez

wzmocnienie hałasu NA - stosunek mocy całkowitego hałasu w danym punkcie do mocy hałasu bezpośredniego

Zdefiniowane wskaźniki SA , SU i NA są - jak widać - wielkościami niemianowanymi i niezależnymi od mocy źródeł dźwięków dzięki założeniu liniowości klasy jako obiektu fizycznego (akustycznego). Jest tak, ponieważ energia każdego z sygnałów odbitych jest wówczas proporcjonalna do mocy źródła. Zatem wskaźniki SA , SU , NA , jako stosunki energii akustycznych, będą opisywały własności samej klasy a nie źródeł. Niezależność tych wskaźników jest oczywista i - jak łatwo zauważyć - nie istnieją inne, niezależne wskaźniki opisujące własności samej klasy jako obiektu transmitującego sygnały mowy i hałasu. Gwarantuje to *zupełność* takiego zestawu wskaźników, jeżeli chodzi o własności samej klasy.

Do kompletu wskaźników określających klimat akustyczny klas należy dołączyć wielkości opisujące własności źródeł w miejscu emisji dźwięku, mianowicie: natężenie

źródła mowy I_{S0} i natężenie źródła hałasu I_{N0} , (z uwzględnieniem ich własności kierunkowych) oraz natężenie szumu tła I_B . Natężenia I_{S0} , I_{N0} określa się zwykle na powierzchniach minimalnych sfer (o promieniach, odpowiednio r_{S0} , r_{N0}) ograniczających źródła dźwięków. Położenie samych źródeł mowy i hałasu dogodniej jest zaliczyć do wskaźników architektonicznych a nie klimatycznych

Klimat akustyczny w klasach jednym źródłem mowy, z jednym punktowym źródłem hałasu oraz danym szumem tła powinien być więc możliwy do opisania za pomocą następującego zestawu wskaźników $\{SA, SU, NA, I_{N0}, I_{S0}, I_B\}$. Na podstawie znajomości tych wskaźników można wyznaczyć kilka bardziej złożonych wskaźników takich jak poziom użytecznego sygnału mowy, poziom hałasu, stosunek sygnału do szumu oraz wskaźnik jakości klimatu akustycznego ze względu na zrozumiałość mowy. Druga część niniejszej pracy będzie poświęcona zagadnieniu istnienia i wyznaczeniu jawnej postaci takiej funkcji.

W celu uwzględnienia zależności współczynnika pochłaniania dźwięku od częstotliwości na ścianach i suficie klasy, wszystkie opisane wskaźniki należy określić w pewnych pasmach (np. tercjach lub oktawach). Wtedy oczywiście zestaw wskaźników klimatu akustycznego powiększa się stosownie do liczby rozpatrywanych pasm częstotliwości. Trzeba tu również zaznaczyć, że klimat akustyczny jest na ogół zależny od położenia w klasie tj. miejsca percepcji sygnałów mowy i hałasu.

LITERATURA

1. J. S. Bradley, Speech intelligibility studies in classrooms, J. Acoust. Soc. Am., 80, 846-854, (1986).
2. J. S. Bradley, H. Sato, Speech Intelligibility Test Results for Grades 1, 3 and 6 Children in Real Classrooms, Proceedings of ICA, Kyoto, (2004).
3. D. J. MacKenzie, S. Airey, Classroom Acoustics: A Research Project, Heriot-Watt University, Edinburgh, (1999).
4. G. W. Evans, S. J. Lepore, Nonauditory effects of noise on children: A critical review. Children's Environments, 10(1), 31-51, (1993).
5. J. Smirnowa, A. Ossowski, Application of objective indices of sound quality in small room acoustics, w materiałach konferencyjnych Otwarte Seminarium z Akustyki XLX, Szczyrk, (2003).