

ADAM ROSIŃSKI
Gdańsk, ASP

AKUSTYKA WNETRZ SAKRALNYCH A WRAŻENIE PRZESTRZENNOŚCI POMIESZCZEŃ

Od wielu stuleci zarówno architektura, jak i akustyka odgrywają znaczącą rolę w projektowaniu i wznoszeniu obiektów sakralnych. Jakość odbioru treści była niegdyś niemal równa poziomowi wizualnego przekazu. Pierwsze świątynie dysponowały bardzo dobrą akustyką, która zależna była od kształtu, wyposażenia pomieszczenia oraz materiałów, z jakich zostało zbudowane samo wnętrze budynku.

Kwestie związane z akustyką pomieszczeń sakralnych od wielu lat są bagatelizowane, a przyczyną tego jest szereg komplikacji wynikający z nieprzewidzianych i trudnych do zbadania zagadnień towarzyszących omawianemu zjawisku. Olbrzymie, pięknie dekorowane pomieszczenia świątynne, pomimo że wywierają silne wrażenie estetyczne, nie charakteryzują się dobrą akustyką. Często wygląd zewnętrzny domu modlitwy stawiany jest przez architektów na pierwszym miejscu, a parametry akustyczne schodzą wówczas na plan dalszy.

Osoby projektujące kościół ogniskują swoje zainteresowanie przeważnie na wyglądzie zewnętrznym świątyni, dbając przede wszystkim o efekt wizualny, dlatego nieprzychylnie nastawieni są do konsultowania projektu architektonicznego z akustykiem. Zaistniałe w tym przypadku anomalie akustyczne i złe warunki dotyczące wrażenia przestrzenności pomieszczenia utrudniają wykorzystanie budowli sakralnej w podstawowych celach, w jakich konstrukcja została zbudowana.

Akustyka wnetrz sakralnych, uformowana metodą przypadkową — bez obliczeń, pomiarów, eksperymentu i doświadczenia — nie stanowi gruntu dla podstawowej roli obiektu sakralnego, czyli nie gwarantuje dobrego wrażenia przestrzenności obiektu sakralnego. Dostosowanie pomieszczenia świątynnego do prawidłowych i zarazem zalecanych parametrów akustycznych jest niezwykle trudne do osiągnięcia. Wynika to z dodatkowych kosztów oraz dokonania zmian wewnątrz budynku.

1. Wrażenie przestrzenności dźwiękowej

Ważnym aspektem, często pomijanym przez architektów, jak i akustyków, jest parametr, który ma bardzo istotne znaczenie w procesie projektowania budowli

sakralnych, ponieważ określa wrażenie przestrzenności pomieszczenia. Wrażenie przestrzenności pomieszczeń wzbudza zainteresowanie naukowców zajmujących się dziedziną akustyki od wielu lat, lecz od 1960 r. nastąpił prawdziwy przełom w badaniach dotyczących przyczyn subiektywności pól dźwiękowych, oddziałujących na wrażenie przestrzenności pomieszczeń sakralnych. Należy zwrócić uwagę na bardzo ważny aspekt — wielu akustyków do określenia parametru wrażenia przestrzenności pomieszczenia używa kilku zamiennych synonimów, takich jak: wrażliwość przestrzenna, wrażenia przestrzenne, atmosfera, szerokość pola źródłowego, przestrzenność, oznaczających to samo pojęcie¹.

Wrażenie przestrzenności dźwiękowej (ang. *spaciousness, envelopment, spatial impression*) rozumiane jest jako obraz wielkości pomieszczenia wytworzony w świadomości słuchacza pod wpływem kierunków dochodzenia fali bezpośredniej i fal odbitych, ich energii oraz stopnia rozproszenia pola akustycznego w pomieszczeniu. Liczbowo wrażenie przestrzenności jest określane jako stosunek energii docierającej do miejsca odsłuchu z kierunków bocznych do energii docierającej w tym samym czasie, lecz bezpośrednio ze źródła. Za boczne przyjmuje się kierunki zawarte między 20° a 90° względem kierunku 0°, określonym na wprost przed słuchaczem, co w przybliżeniu odpowiada układowi charakterystyk kierunkowych uszu człowieka².

Stąd możliwe jest dokładne lokalizowanie przez wiernych osoby przemawiającej dzięki dźwiękowi pochodzącemu ze źródła dźwięku (aparatu mowy kapłana).

Bezpośredni wpływ na wrażenie przestrzenności pomieszczenia ma stopień rozproszenia energii w polu akustycznym. Tę własność można rozpatrywać hermeneutycznie i wielotorowo, a wieloaspektowość tego spojrzenia polega na podziale według trzech kryteriów: kierunkowego, przestrzennego i widmowego³. „Metoda ilościowej oceny stopnia kierunkowego rozproszenia energii została opracowana przez Thiele’go, który zaproponował tzw. współczynnik rozproszenia kierunkowego”⁴.

Wrażenie przestrzenności nazywane jest również spontanicznym wrażeniem słuchacza; odbiorca otrzymuje informacje o rodzaju, rozmiarze i innych cechach rzeczywistej lub symulowanej przestrzeni. Pamiętajmy, że istnieją dwie fazy wrażenia przestrzenności pomieszczenia: faza wczesna oraz późna. Faza wczesna dotyczy przedziału czasowego poniżej 80 ms, natomiast faza późna odnosi się do czasu powyżej 80 ms. We wczesnej fazie przedziału czasowego tworzony jest obraz odpowiadający szerokości odbioru dźwiękowego. W późniejszym etapie przedziału czasowego (powyżej 80 ms) otrzymujemy wrażenie przestrzenności rozumianej jako otoczenie dźwiękiem⁵.

¹ H. KUTTRUFF, *Room acoustics*, New York 2000, s. 222–223.

² Cyt. A. KULOWSKI, *Akustyka sal. Zalecenia projektowe dla architektów*, Gdańsk 2011, s. 297.

³ *Tamże*, s. 297–298.

⁴ *Tamże*, s. 298.

⁵ G. MARSHALL, *Acoustical design: places for listening*, w: W.J. CAVANAUGH, G.C. TOCCI, J.A. WILKES (red.), *Architectural acoustics. Principles and practice*, Hoboken (NJ) 2010², s. 137–140.

2. Wpływ akustyki pomieszczenia na wrażenie jego przestrzenności

W 1967 r. Reichardt i Schmidt zauważyli, że wrażenie przestrzenności, dla których ustalono subiektywną skalę, rośnie monotonicznie wraz z energią pogłosową w stosunku do energii dźwięku bezpośredniego. Keet natomiast zwrócił uwagę, że wrażenie przestrzenne zależne jest od poziomu odsłuchu, stąd wrażenie to nie jest jednostajne i nie prezentuje jednowymiarowego odczucia przestrzenności. Najważniejszymi aspektami, według Keeta, są: widoczna szerokość źródła (ang. *apparent source width*) oraz otoczenie słuchacza dźwiękiem (ang. *listener envelopment*)⁶. Wykrycie asymetrii wczesnych odbić dźwięku jest istotnym czynnikiem, ponieważ dzięki temu wrażenie przestrzenności może zostać zarejestrowane w odmienny sposób przez odbiorcę.

Przez długi czas sądzono, niestety błędnie, że przestrzenność była wyłącznie funkcją jednolitości kierunkowej w polu dźwiękowym. Sądzono, że im bardziej jednolita kierunkowość, tym wyższy stopień przestrzenności. Fakt ten tłumaczono podając przykład, że w wielu słynnych salach o bardzo dobrych parametrach akustycznych ściany i sufit były bardzo dobrze zaprojektowane pod względem wnęk, filarów, rzeźbień, a nawet statuetek, które wpływały na rozproszenie dźwięku.

Wprowadzenie komputerów na grunt badań naukowych obejmujących dziedzinę akustyki zaowocowało znaczącym postępem w tej dziedzinie. Wprowadzenie cyfrowych – syntetycznych pól dźwiękowych, jako aparatu badawczego, przyczyniło się do zweryfikowania twierdzeń; odkryto, iż jednolitość kierunkowa sygnałów dźwiękowych nie jest główną przyczyną przestrzenności. Według Damaske wrażenia przestrzenne mogą być wytworzone sztucznie poprzez kilka źródeł syntetycznych. Warunkiem osiągnięcia uczucia przestrzenności jest dojście do słuchacza odbić dźwięku z kierunków bocznych. Niestety, sygnały maskujące się wzajemnie, pochodzące z pierwszego sygnału dźwiękowego, są niespójne i mogą zaburzać tworzenie w umyśle wiernych wrażenia przestrzenności pomieszczenia⁷.

Problematyka ta była przedmiotem badań prowadzonych przez Brandley'a i Soulodre'a. Stworzyli oni sztuczne pole dźwiękowe złożone z pięciu głośników, z których jeden był umieszczony z przodu, a cztery głośniki z boku o odpowiednio obranych kątach; 35° i 90°. Wspomniane urządzenia głośnikowe symulowały dźwięk bezpośredni oraz pojedyncze odbicia wczesne opóźnione o 15, 40, 50 i 70 ms. W celu dokładniejszego zbadania problemu wygenerowano również sztuczny pogłos trwający powyżej 80 ms. Eksperyment ujawnił, że zmiany w czasie pogłosu, sile energii sygnałów początkowych oraz energii wczesnych i późnych odbić są mniej

⁶ KUTTRUFF, *Room acoustics*, s. 224.

⁷ H. KUTTRUFF, E. MOMMERTZ, *Room acoustic*, w: G. MÜLLER, M. MÖSER (red.), *Handbook of Engineering Acoustics*, Berlin – Heidelberg 2013, s. 242–248.

istotne przy budowaniu wrażenia otoczenia dźwiękiem. Natomiast największe znaczenie miało rozmieszczenie kątowe głośników. Im większe kąty zastosowano, tym słuchacz bardziej odczuwał wrażenie przestrzenności pomieszczenia. Analiza korelacji wykazała, że największy wpływ na poczucie wrażenia przestrzenności mają: późne odbicia boczne oraz pasma częstotliwościowe z zakresu 125Hz, 250Hz, 500Hz i 1000Hz. Wynik ten oznacza, że wysokie składowe częstotliwości nie pełnią szczególnej roli w zwiększeniu wrażenia przestrzenności pomieszczenia⁸. Należy dodać, że Barron i Marshall w swoich badaniach także stwierdzili, że boczne odbicia od kąta 90° powodują największe przestrzenne wrażenie. Wczesne odbicia, które zostały wytworzone do około 20 ms, znacznie wpływają na zabarwienie widmowe sygnału dźwiękowego. Samo zabarwienie rzutuje także na omawiane wrażenie, jak również na możliwość otaczania dźwiękiem słuchacza. Zabarwienie dotyczy filtracji grzebieniowej, która może tłumić jedne częstotliwości i wzmacniać inne — w zależności od rodzaju wnętrza sakralnego. Warto zwrócić uwagę, że odbicia (refleksje) powstałe często po 7 ms wpływają na widmo dźwięku i na filtrację grzebieniową. Dlatego też nie powinny być pomijane przy obliczeniach, ponieważ mogą mieć różną strukturę oddziaływania oraz moc, w zależności od rodzaju, wielkości i typu pomieszczenia świątynnego⁹.

Wrażenia przestrzenności pomieszczeń spowodowane odbiciami par refleksyjnych (opóźnienia pomiędzy ok. 5 i 80 ms) są w przybliżeniu stałe. W wyniku tych doświadczeń, Barron i Marshall do pomiaru wrażenia przestrzennego zaproponowali nazwę „boczna frakcja” (ang. *lateral fraction* — LF)¹⁰. Najnowsze badania udowadniają, że odbicia boczne o kącie ok. $\pm 90^\circ$ nie są optymalne do tworzenia we wszystkich częstotliwościach wrażenia przestrzenności pomieszczenia. Oznacza to, że kąt $\pm 90^\circ$ wpływa na wrażenie przestrzenności pomieszczenia w ściśle określonych pasmach częstotliwości¹¹. W takim przypadku dla różnych częstotliwości należałoby wskazać nowe, inne kąty, powodujące lepsze wrażenie przestrzenności pomieszczeń sakralnych.

Dźwięk bezpośredni oraz dźwięki pochodzące z odbić są bardzo ważne przy tworzeniu obrazu przestrzennego. W kościołach można dodatkowo zmodyfikować orientację w zlokalizowaniu dochodzenia dźwięku poprzez niewspółosiowość akustyki fizycznej. Dzieje się tak podczas zmiany w umiejscowieniu źródła dźwięku na boczny, przy zastosowaniu systemu nagłaśniającego na kolumnach bocznych

⁸ G.W. SIEBEIN, B.Y. KINZEY, *Recent innovations in acoustical design and research*, w: CAVANAUGH, TOCCI, WILKES (red.), *Architectural acoustics. Principles and practice*, s. 229–230.

⁹ J. BREEBAART, CH. FALLER, *Spatial audio processing. MPEG surround and other applications*, Hoboken (NJ) 2007, s. 39.

¹⁰ J. MEYER, *Acoustic and the performance of music. Manual for acousticians, audio engineers, musicians, architects and musical instrument makers*, Braunschweig 2009⁵, s. 197–200.

¹¹ BREEBAART, FALLER, *Spatial audio processing*, s. 42–43.

pomieszczeń sakralnych, którego celem jest nagłośnienie organisty lub kapłana. Dopiero wtedy następuje zamiana dźwięku bezpośredniego, dochodzącego z głośnika, oraz wczesnych odbić, które pochodzą z dźwięku generowanego sztucznie. Musimy być świadomi, że sygnał boczny staje się sygnałem głównym, stąd podstawowe źródło dźwięku zmienia swoje położenie, co może być przyczyną zmiany orientacji przestrzennej w budynkach sakralnych, bądź jej zaburzeń¹². Dlatego system akustyczny powinien zostać zaprojektowany w taki sposób, żeby nie wprowadzał zniekształceń i anomalii do naturalnego pola akustycznego świątyni. Aby uzyskać wrażenie przestrzenności pomieszczeń sakralnych, należy zmienić pod względem widmowym sygnały docierające do różnych głośników. Pamiętajmy, że zjawisko to można przekształcić, jeżeli w półkolu ułożymy głośniki wewnątrz pomieszczenia i każdy z głośników przetwarzać będzie zmieniony pod względem widmowym sygnał dźwiękowy¹³.

Należy zaznaczyć, iż w doznaniu przestrzenności widoczne są ogromne różnice pomiędzy muzyką liturgiczną a komunikatami słownymi. Mowa zachowuje stałe prawidła, jakimi jest głośność, szybkość mówienia (bez względu na różnice językowe) i wysokość głosu — zmiany podanych cech są drobne i nie rzutują w dużym stopniu na wrażenie przestrzenności. Natomiast w przypadku organów ważnym aspektem jest sposób umiejscowienia instrumentu w kościele, a także różnorodność amplitud, barw, wysokości i czasu trwania dźwięków instrumentu. Zmienny i nieustalony charakter muzyki przyczynia się do wielu procesów akustycznych zachodzących w pomieszczeniach sakralnych. W rozumieniu percepcji słuchowej brzmienie organów jest uzależnione m.in. od pogłosu pomieszczenia i jego czasu trwania. W ten sposób elementy te, nakładając się, tworzą nową jakość całości — w odniesieniu do nowego, wypadkowego brzmienia. Warto wiedzieć, że mowa i dźwięk instrumentu nie są świadomie postrzegane jako oddzielne, ich oddziaływanie może być bardzo różne, zależne od cech akustycznych pomieszczenia¹⁴.

Kolejnym aspektem, który powinien zostać szerzej omówiony, jest frekwencja i sama obecność wiernych, jak również materiały, z których uszyte są ich ubrania. Czynniki te mają w pomieszczeniu zamkniętym silne działanie akustyczne — ilość osób zmienia proporcjonalnie walory akustyczne. Dlatego też badania prowadzone w tej dziedzinie powinny opierać się na dwóch założeniach¹⁵. Eksperyment powi-

¹² G.S. KENDALL, M. ARDILA, *The artistic play of spatial organization: Spatial attributes, scene analysis and auditory spatial schemata*, w: R. KRONLAND-MARTINET, S. YSTAD, K. JANSEN (red.), *Computer Music Modeling and retrieval. Sense of sounds. 4th International symposium, CMMR 2007*, Berlin 2008, s. 129.

¹³ M. BARRON, *Auditorium acoustics and architectural design*, New York 1993, s. 48–50.

¹⁴ G. BALLOU, *Handbook for sound engineers*, Oxford 2008⁴, s. 160–161.

¹⁵ L. BERANEK, *Concert halls and opera houses. Music, acoustics and architecture*, New York 2004², s. 15–18.

nien być wykonywany w pomieszczeniu sakralnym, które posiada całe wyposażenie, lecz jest puste, oraz z wypełnieniem ok. 70% ludzi. Należy dodać, że badania nie przeprowadza się przy 100%, frekwencji, ponieważ mogłoby to zafałszować wyniki. Dzięki temu doświadczeniu dowiemy się, jak wierni oddziałują na dźwięk w danym pomieszczeniu; czy ich obecność nie powoduje żadnych anomalii akustycznych, a także, czy istnieją jakiekolwiek przesłanki (zauważone w wypełnionym pomieszczeniu) mówiące o złym projekcie architektonicznym.

Pamiętajmy, że powietrze również oddziałuje na akustykę pomieszczeń, ponieważ absorbuje fale dźwiękowe, stąd projektowanie budynków sakralnych powinno opierać się również na wiedzy o przekazywaniu energii w ośrodku sprężystym¹⁶.

3. Psychoakustyczne postawy a wrażenie przestrzenności pomieszczeń

W swobodnym polu istnieje możliwość binauralnego (dwuusznego) odbierania sygnałów dźwiękowych, które oddziałują na odczucie wrażenia przestrzenności pomieszczenia. Stąd odległość obiektu słuchowego i zmiany w funkcji odległości od źródła powodują zmiany w widmie dźwięku. Zbliżenie do źródła dźwięku, a przez to zmniejszenie odległości powoduje zmianę w zakresie pasm wszystkich częstotliwości ILD.

Mózg konstruuje model przestrzeni na podstawie trzech wyznaczników: stosunku opóźnień, z jakim sygnał dociera do uszu z punktu znajdującego się w różnych odległościach od nich (ang. *Interaural Time Delay* — ITD); różnicy w głośności między tymi sygnałami (ang. *Interaural Level Distance* — ILD) oraz w tym przypadku najważniejszej — różnicy częstotliwości dźwięku, jaki dociera z różnych kierunków (ang. *Head-Related Transfer Function* — HRTF)¹⁷.

W omawianym zjawisku duże znaczenie ma również moc sygnału oraz analiza widmowa wysokich częstotliwości, które mogą być częściowo zmieniane przez absorpcję powietrza. Dźwięk bezpośredni dostarcza informację o odległości od źródła dźwięku — najlepiej percypowane są dźwięki naturalne, takie jak mowa, które wskazują odległość i położenie źródła dźwięku. Jednak w sytuacjach, gdy słuchacz nie jest przygotowany lub źródło dźwięku nie jest jednorodne, to całkowity poziom dźwięku przy wejściu do uszu nie może być używany do oceny absolutnej odległości. W takiej sytuacji ogólny poziom zapewnia jedynie względne wyznaczenie kierunku dochodzenia dźwięku¹⁸.

Według Griesingera najważniejszymi aspektami związanymi z wrażeniem przestrzenności pomieszczenia są trzy strumienie dźwiękowe dochodzące do słuchacza, które nazwał: ciągłym wrażeniem przestrzennym (ang. *continuous spatial impres-*

¹⁶ L. BERANEK, T.J. MELLOW, *Acoustics. Sound fields and transducers*, Oxford 2012, s. 472.

¹⁷ http://audio.com.pl/pdf/akademia/2003_09_p47.pdf (25.02.2013).

¹⁸ BREEBAART, FALLER, *Spatial audio processing*, s. 39–40.

sion — CSI), wczesnym wrażeniem przestrzennym (ang. *early spatial impression* — ESI) i przestrzennym wrażeniem tła (ang. *background spatial impression* — BSI). Dwuosłyszny system odbioru dźwięku poddawany jest oddziaływaniom przez powyższe strumienie. Oznacza to, że różne kanały (strumienie dźwiękowe, odbicia dźwięku) dochodzące do uszu z różnym opóźnieniem powodują wytworzenie trójwymiarowego obrazu dźwiękowego, co odpowiada za kreowanie własności dźwięku wywołującego wrażenie przestrzenności pomieszczeń sakralnych¹⁹. Istnieje jeszcze odrębny podział sygnałów dźwiękowych dotyczący stosunków widmowych pomiędzy kanałami. Dzięki tym relacjom otrzymujemy możliwość odczucia szerszej bazy stereofonicznej, bądź otaczania słuchacza dźwiękiem. Cechy sygnałów międzykanałowych to: międzykanałowe różnice czasu (ang. *inlerchannel time difference* — ICTD), międzykanałowe różnice poziomów (ang. *interchannel level difference* — ICLD) oraz spójność międzykanałowa (ang. *interchannel coherence* — ICC)²⁰. Mózg człowieka na podstawie różnych danych składa w całość sumę informacji przetwarzanych przez uszy i automatycznie wybiera najważniejsze cechy sygnałów. Różnice spektralne (widmowe) i opóźnieniowe w dochodzeniu fal dźwiękowych do obu uszu powodują tworzenie wrażenia iluzji przestrzennej, nazywanej wrażeniem przestrzenności.

Przestrzenne atrybuty dźwiękowe poddane analizie obrazów słuchowych powinny tworzyć jednolitą konstrukcję percepcyjną. Własności te umożliwiają zaobserwowanie przestrzenności w zakresie szerokości i odległości źródła dźwięku. Rumsey oddziela atrybuty przestrzenne od własności przestrzennych pomieszczeń²¹. Wrażenie dźwięku trójwymiarowego zależne jest od cech przestrzeni, takich jak: szerokość, odległość, kierunek i głębokość. Wspomnieć należy, że efekt ten proporcjonalny jest do kubatury (generowanie pogłosu), czyli im większe pomieszczenie, tym bardziej widoczny wpływ na odczucie przestrzenności. Wrażenie przestrzenności wewnątrz sakralnych rozumiane jest jako doświadczenie otoczenia człowieka dźwiękiem lub wrażenie szerokości obrazu dźwiękowego. Zjawisko to zaistnieć może dzięki kilku różnym źródłom dźwięku ustawionym w różnych miejscach w pomieszczeniu, jak również w wyniku oddziaływania jednego źródła dźwięku poprzez odbicia wczesne i późne²².

5. Konkluzje

Wrażenie przestrzenności powstaje w wyniku odbioru i interpretacji dźwięku bezpośredniego oraz dźwięków odbitych. Odczuwanie przestrzeni przez słuchacza

¹⁹ F. RUMSEY, *Spatial audio*, Oxford 2001, rozdz. III.

²⁰ FALLER, *Spatial audio coding*, s. 639.

²¹ KENDALL, ARDILA, *The artistic play*, s. 128.

²² *Tamże*, s. 130–132.

wypływa z odbić dźwięku w zamkniętych pomieszczeniach. Słuch ludzki nie jest w stanie zinterpretować wszystkich odbić wewnątrz danego lokum, natomiast wskazówki te wykorzystywane są podczas procesu tworzenia wrażenia przestrzenności²³.

Warto zwrócić uwagę na rolę pogłosu w kształtowaniu wrażenia przestrzenności pomieszczeń sakralnych. Wrażenie przestrzenności nie zostanie osiągnięte przy udziale samego pogłosu i np. jednego głośnika, z którego dochodzi dźwięk (w tym przypadku czas pogłosu nie ma znaczenia, ponieważ zaistniało jedno źródło dźwięku). Jeżeli dźwięk jest przetwarzany przez kilka głośników, umieszczonych w różnych odległościach, lecz w różnych kierunkach, do których dochodzi identyczny sygnał, to wierni również nie odczuwają efektu przestrzenności dźwięku. Jeśli jednak do głośników zostaną dostarczone sygnały dźwiękowe różniące się widmem, to efekt przestrzenności dźwięku zostanie uzyskany.

Kryteria akustyczne obejmują zarówno aspekty subiektywne, jak i obiektywne. Subiektywne odnoszą się do odczuwanej przez człowieka niemierzalnej w sposób bezpośredni akustycznej przestrzeni i wyrazistości brzmienia. Natomiast obiektywne aspekty podlegają ścisłym badaniom (są mierzalne przez stosowne oprzyrządowanie), które można opisać przy pomocy fizycznego opisu dźwięków i parametrów pola akustycznego. Akustycy i architekci powinni posługiwać się dwoma rodzajami omówionych wyznaczników, ponieważ stosuje się je w zależności od rodzaju i sposobu użytkowania przestrzeni oraz od rodzaju materiałów, z jakich zostało wykonane pomieszczenie. Przypomnieć należy, że kryteria dla mowy i dla muzyki liturgicznej występującej w kościele są zupełnie odmienne²⁴.

Akustyczny projekt wnętrz sakralnych powinien wykorzystywać wszystkie znane procedury, poprawiające akustykę danego wnętrza. W takim przypadku stosuje się obiektywne metody i kryteria wraz z subiektywnymi elementami, które im towarzyszą. Powinno się podkreślić, że zadawalające wrażenia akustyczne to zbiór subiektywnych wrażeń i obiektywnych — mierzalnych parametrów pola akustycznego w danej budowli świątynnej²⁵. Pomiaru dokonujemy w różnych punktach obiektu sakralnego, tak aby przesunięcie punktów kontrolno-pomiarowych najwierniej odwzorowało odbiór elementów muzycznych czy słownych, wykonywanych zarówno przez kapłana, jak i organistę. Badania mogą również opierać się na cyfrowym, syntetycznym modelowaniu danej przestrzeni w celu uwidocznienia miejsc, w których wrażenie przestrzenności jest najlepsze i najgorsze.

Ważnym aspektem są właściwości odbicia dźwięku bezpośredniego; nie chodzi tutaj wyłącznie o czas dojścia tego dźwięku, lecz o przekształcenie charakterystyki widmowej przy odbiciu od różnych powierzchni. Największe znaczenie mają w przy-

²³ BARRON, *Auditorium acoustics and*, s. 44–47.

²⁴ P. KÖLTZSCH, V. BORMANN, *Structure generation under subjectivity: Selected examples from acoustics*, w: K. LUCAS, P. ROOSEN (red.), *Emergence analysis and evolution of structures. Concepts and strategies across disciplines*, Heidelberg 2010, s. 244.

²⁵ Tamże, s. 244–245.

padku odczucia przestrzenności pomieszczeń dźwięki dochodzące z boków, które wpływają na lateralizację obiektów słuchowych, częściowo pochłaniając i odbijając dźwięk, a w ten sposób zmieniając jego strukturę spektralną²⁶.

Do zaburzeń wrażenia przestrzenności pomieszczenia zakwalifikować możemy:

- zbyt dużą lub zbyt małą ilość pogłosu,
- zbyt dużą kubaturę,
- nieodpowiedni kształt pomieszczenia oraz układ materiałów pochłaniających i odbijających dźwięk,
- problemy w odczuwaniu przestrzenności pomieszczenia w wybranych punktach (nawet przy prawidłowym rozstawieniu systemu nagłośnieniowego),
- zły odbiór dźwięku mówionego spowodowany nieprawidłową konstrukcją lub zabudową ołtarza,
- nieprawidłowy projekt architektoniczny ścian, podłogi i sufitu,
- niewłaściwe materiały, z których zbudowane są ławki kościelne, oraz wpływ wiernych na widmo kształtowania dźwięku,
- chłonność akustyczna pomieszczeń sakralnych,
- stopień rozproszenia energii w polu akustycznym oraz stopień rozproszenia kierunkowego w polu w stanie stacjonarnym,
- zjawisko naturalnego zanikania dźwięku.

Wyodrębnienie atrybutów przestrzennych z innych własności jest szczególnie przydatne przy percepcji źródeł dźwięku dochodzących jednocześnie z różnych stron. Przestrzenna organizacja słuchowa ma pewne ograniczenia, dlatego człowiek może rozróżniać tylko do kilku atrybutów, które tworzą wrażenie przestrzenności²⁷.

Nie zapominajmy, że istnieje bariera i limitacja spektralna rozdzielczości systemu słuchowego (tzw. pasma krytyczne), których nie można się nauczyć, zmienić lub poszerzyć. Stąd nie zaleca się tworzenia zbyt szerokiej bazy stereofonicznej, gdyż ta nie zostanie prawidłowo zinterpretowana przez mózg ludzki. Ósrodkowe dodawanie różnych widm w mózgu daje świadectwo wrodzonych umiejętnościach człowieka, potrafiącego odseparować różne brzmienia (widma). Każde odbicie (filtracja grzebieniowa) odbierane z opóźnieniem przez lewe i prawe ucho jest przyczyną powstawania wrażenia przestrzeni, często zwanego przestrzenią wirtualną²⁸.

6. Zakończenie

Wrażenie przestrzenności pomieszczeń w przypadku obiektów sakralnych jest bardzo istotnym elementem. Dzięki prawidłowemu projektowi architektonicznemu pod względem akustycznym wierni odczuwają otoczenie dźwiękiem. Ważnym as-

²⁶ M. LONG, *Architectural acoustics*, Amsterdam – Boston 2006, s. 235–239.

²⁷ KENDALL, ARDILA, *The artistic play*, s. 129.

²⁸ F. TOOLE, *Sound Reproduction. Loudspeakers and rooms*, Burlington (MA) 2008, rozdz. IX.

pektem jest to, że dźwięk nie jest bardzo głośny, lecz nośny i o wysokim współczynniku zrozumiałości. Właściwości te powodują, że słowa kapłana mogą być prawidłowo rozpoznane i rozumiane, a śpiew organisty oraz instrument prawidłowo będą wybrzmiewać w całym kościele. Odpowiednie wrażenie przestrzenności pomieszczenia sprawia, że dźwięki są właściwie odbierane i nie zachodzą zaburzenia w lokalizacji ich źródła.

Pojęcie „dobrej akustyki” pomieszczenia, niestety, nie istnieje, ponieważ „dobra akustyka” świątyni jest zupełnie inna od akustyki pomieszczenia opery, a ta z kolei całkowicie odmienna od sali kinowej itp. Warto podkreślić, że każdemu pomieszczeniu już u podstaw projektu architektonicznego nadaje się pewne cechy (w tym również cechy akustyczne). Plan budowli uzależniony jest od wielu czynników, w tym również celu powstania danego budynku lub pomieszczenia. Finalny efekt prawidłowego brzmienia jest wynikiem połączenia wszelkich elementów konstrukcyjnych w całość. Niebagatelne jest także samo położenie kościoła²⁹. Jeżeli budynek sakralny znajduje się w pobliżu głośnych ulic, powinien zostać zaprojektowany w taki sposób, aby odizolować zewnętrzne zakłócenia. Zapewniając w fazie konstrukcyjnej izolację od dźwięków powietrznych, uderzeniowych oraz przekazywanych przez podłoże, unikniemy drgań i rezonansów wewnętrznych, które to mogłyby negatywnie rzutować na akustykę wewnątrz budynku świątynnego³⁰.

Akustyka wewnątrz sakralnych jest bardzo ważna, ponieważ dzięki niej zgromadzeni mogą jednoczyć się we wspólnej modlitwie, a więc osiąga się właściwy cel, dla którego zbudowano tę budowlę. Choć powinniśmy pamiętać o doznaniach słuchowych w świątyniach, często o tym zapominamy. Stwierdzić można zatem, że doznania wizualne zawsze są zachowane, dźwiękowe — niekoniecznie.

Przedstawiona problematyka ma na celu pomoc w uzyskaniu odpowiedniego wrażenia przestrzenności pomieszczeń sakralnych z uwzględnieniem ich podstawowych funkcji. Jest to również próba odpowiedzi na treści problemowe dotyczące częstych zaburzeń wrażenia przestrzenności, na które natykają się architekci i akustycy podczas projektowania i wznoszenia budynków świątynnych oraz na zachodzące zmiany w architekturze i budownictwie sakralnym zaobserwowane w ostatnich latach.

Z całą mocą należy podkreślić rolę akustyki wewnątrz sakralnych jako niezbędnego nośnika informacji, a także miejsca *sacrum*, w którym można współuczestniczyć w sposób pełny w uroczystych obrzędach. To właśnie akustyka pozwala na zapewnienie wrażenia przestrzenności pomieszczeń, co wpływa na właściwą lokalizację i interpretację kierunku dochodzenia słów kapłana, brzmienia instrumentu i śpiewu organisty podczas liturgii i nabożeństw.

²⁹ BERANEK, *Concert halls and*, s. 1–3.

³⁰ J.P. TALBOT, *Base isolation of buildings for control of Ground-borne Vibration*, w: M.J. CROCKER (red.), *Handbook of noise and vibration control*, Hoboken (NJ) 2007, s. 1470–1478.

The acoustics of sacred interiors against spatial impression

Abstract

The acoustics of sacred rooms is a substantial factor, which is often belittled by architects. Architectonic designing of sanctuary building ought to be based on consultation pertained to acoustics of each sacred building. The author of the following publication, perceiving many acoustic discrepancies concerning sacred interiors, sets himself an aim: to present general acoustic problems relative to the crucial acoustic parameter — spatial impression. The following parameter resultant from the improper architectonic project poses a serious acoustic problem. It causes disturbance in the comprehension of priests words and anomalies concerning resounding of liturgical music. The topic of this article connects knowledge of specialized disciplines, which thorough understanding expands versatility and skill of architects, acousticians and clerics, not to mention the better results in improvement of sacred interior's acoustics.

