ARCHITEKTURA
CZASOPISMO TECHNICZNE
TECHNICAL TRANSACTIONS
ARCHITECTURE
WYDAWNICTWO POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ
2-A/1/2011
ZESZYT 11
ROK 108
ISSUE 11
YEAR 108

KRZYSZTOF KOSAŁA, TADEUSZ KAMISIŃSKI*

AKUSTYKA WIELOFUNKCYJNA WNĘTRZ SAKRALNYCH

ACOUSTICS OF MULTIFUNCTIONAL SACRAL INTERIORS

Streszczenie

Wielofunkcyjność budowli sakralnych jest naturalną cechą charakteryzującą służebność tych obiektów dla określonej społeczności. Pozaliturgiczne wykorzystanie wnętrz do realizacji muzyki i emisji słowa, wymaga jednak właściwej adaptacji akustycznej. W niniejszym artykule przedstawiono na przykładzie kościoła pw. św. Pawła Apostoła w Bochni częsty problem z akustyką występujący w obiektach sakralnych wybudowanych w ostatnim czterdziestoleciu. Nadmierna pogłosowość wnętrza źle wpływa na zrozumiałość mowy i jakość brzmienia muzyki. Na podstawie wykonanych pomiarów akustycznych wnętrza kościoła oraz wielowariantowych symulacji komputerowych zaproponowano adaptację akustyczną, która może rozwiązać ten problem przy jednoczesnym zachowaniu formy architektonicznej obiektu.

Słowa kluczowe: *adaptacja akustyczna*, *jakość akustyczna*, *obiekty sakralne*, *czas pogłosu*

Abstract

Multifunctionality of sacral buildings is a natural feature of usefulness such objects for specific community. However, extra-liturgical utilization of the interiors for realization of music and speech issue demands a proper acoustics adaptation. A frequent problem with acoustics in sacral objects which were built in the last forty years, on example of the St. Paul Apostle's Church in Bochnia, was shown in the paper. An excessive interior's reverberation influences badly on the speech intelligibility and the music sound quality. On the basis of acoustics investigations performed in church's interior as well as multivariant computer simulations, acoustics adaptation which may solve this problem with preservation of architectural shape of object was proposed.

Keywords: *acoustics adaptation*, *acoustics quality*, *sacral objects*, *reverberation time*

* Dr inż. Krzysztof Kosała, dr inż. Tadeusz Kamisiński, Katedra Mechaniki i Wibroakustyki, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, Akademia Górniczo-Hutnicza.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

1. Wstęp

Projektowanie parametrów akustycznych dla pomieszczeń użyteczności publicznej, takich jak sale koncertowe, operowe, audytoria, czy obiekty sakralne związane jest z funkcją przewidzianą dla danego wnętrza. Do głównej funkcji obiektów sakralnych należy zapewnienie podniosłej atmosfery kultu z użyciem dobrej emisji słowa, śpiewu chóralnego oraz muzyki. W wielu przypadkach obiekty sakralne wykorzystywane są przez społeczność lokalną jako duże wnętrza do prowadzenia działalności dydaktycznej i kulturalnej. Najczęściej jednak, ze względu na znaczną kubaturę takich obiektów i brak adaptacji akustycznej, charakteryzują się one nadmierną pogłosowością, co zaburza zrozumiałość mowy, a akceptowane jest jedynie dla muzyki organowej [8, 12].

Akustyka współcześnie wznoszonych oraz wybudowanych w ostatnim czterdziestoleciu obiektów sakralnych stanowi częsty problem przy użytkowaniu tego typu wnętrz. Przy projektowaniu tych obiektów, wznoszeniu i modernizacji nie przywiązywano należytej wagi do prawidłowego kształtowania ich właściwości akustycznych [1, 2, 3]. Nowoczesne świątynie często wymagają adaptacji akustycznych zmniejszających nadmierną pogłosowość wnętrz i korygujących charakterystykę czasu pogłosu.

Oprócz sprawowania obrzędów liturgicznych wiele obiektów sakralnych pełni także funkcję koncertową. Między innymi są to obiekty: kościół pw. Marii Magdaleny we Lwowie [7, 9], kościoły: św. Katarzyny, św. Piotra i Pawła [1], bazylika Mariacka w Krakowie oraz będący przedmiotem badań opisanych w artykule kościół pw. św. Pawła Apostoła w Bochni. Nowoczesne, oparte na planie elipsy wnętrze kościoła charakteryzuje się niestety zbyt dużą pogłosowością, która źle wpływa na zrozumiałość mowy oraz na jakość brzmienia muzyki. Na podstawie wykonanych pomiarów akustycznych wnętrza kościoła oraz wielowariantowych symulacji komputerowych zaproponowano adaptację akustyczną, która może rozwiązać ten problem przy zachowaniu formy architektonicznej obiektu.

Il. 1. Wnętrze kościoła: a) pustego, b) podczas koncertu [13]

Il. 1. Church's interior: a) empty one, b) with the concert inside [13]

Kościół pw. św. Pawła Apostoła w Bochni wzniesiony został w latach 1981–1985. Elewację budynku przedstawia il. 2a. Wykończenie ścian wewnętrznych stanowią tynki wapienno cementowe. Budynek posiada metalowe podwójnie szklone okna witrażowe oraz posadzkę z łamanego marmuru. Sufit nawy głównej stanowią przekrycia kryształowe. Kubatura

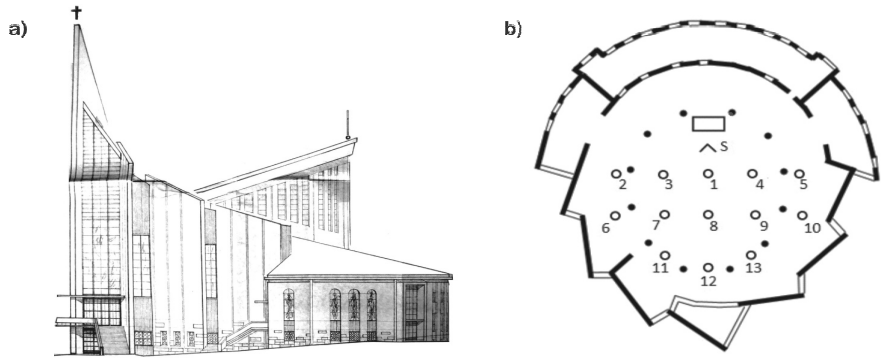
BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

wnętrza, obliczona za pomocą modelu komputerowego 3D, wynosi 13997 m^3. Nawy wraz z prezbiterium mają powierzchnię 812 m^2, natomiast dwie kaplice boczne razem 120 m^2. Wysokość maksymalna nawy głównej wynosi 22, szerokość 31 i długość 36 m.

We wnętrzu kościoła przeważają powierzchnie gładkie, twarde, płaskie oraz wklęsłe (il. 1a), które powodują odbicie fal dźwiękowych. Kościół pw. św. Pawła Apostoła w Bochni spełnia także funkcję pozaliturgiczną; odbywają się liczne koncerty muzyki klasycznej, oratoria i występy chórów (il. 1b).

2. Badania akustyczne wnętrza

Pomiary wybranych parametrów akustycznych przeprowadzono w kościele bez publiczności. Sygnał pomiarowy emitowany był przez wszechkierunkowe źródło dźwięku sterowane i synchronizowane z systemem pomiarowym przez program Dirac v4.0. Odpowiedź impulsową wnętrza zarejestrowano poprzez mikrofon pomiarowy i kartę dźwiękową.



Il. 2. Kościół pw. św. Pawła Apostoła w Bochni: a) elewacja północna, b) plan kościoła wraz z rozmieszczeniem punktów pomiarowych (o – pozycje mikrofonu, S – źródło dźwięku)

Ill. 2. The St. Paul Apostle's Church in Bochnia: a) the north facade, b) general lay-out of the church with measurement points arrangement (o – the microphone positions, S – sound source)

Na podstawie uzyskanych odpowiedzi impulsowych wyznaczono parametry akustyczne wnętrza: czas pogłosu T_{30}, wskaźnik zrozumiałości mowy RASTI, wskaźnik wyrazistości dla muzyki C_{80}, czasowy środek ciężkości echogramu T_S. Nie podjęto badań istniejącej instalacji nagłośnieniowej kościoła. W tabeli 1 zestawiono uzyskane z pomiarów, uśrednione w porównaniu z wartościami zalecanymi wartości parametrów akustycznych.

Tabela 1

Wartości parametrów akustycznych otrzymanych z badań oraz zalecane dla wnętrza kościoła

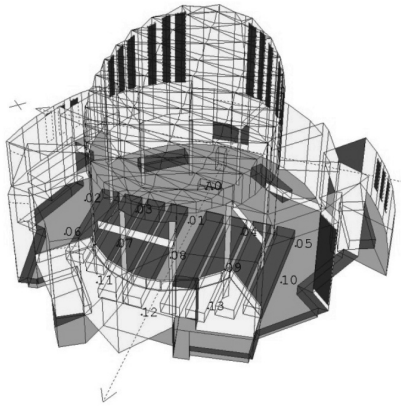
Parametry akustyczne	T_{30} [s]							RASTI	C_{80} [dB]	T_S [ms]
	f [Hz]						średni			
	125	250	500	1k	2k	4k				
Wartości zmierzone	8,3	9,0	9,7	9,1	7,4	4,7	8,1	0,22	–6,7	591
Wartości zalecane	2,1 [12]							> 0,6 [11]	0–5 [10]	100–150 [4]

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Zestawione w powyższej tabeli parametry akustyczne uzyskane z badań znacznie odbiegają od zalecanych wartości. Zrozumiałość mowy oceniona została jako zła.

3. Badania symulacyjne

W celu analizy pola akustycznego wnętrza kościoła sporządzony został model geometryczny obiektu, składający się z 522 powierzchni (il. 3). Badania symulacyjne na modelu geometrycznym wykonane zostały w programie CATT-Acoustic v.8 [5], gdzie punkty pomiarowe oraz usytuowanie źródła dźwięku (il. 3), były zgodne z punktami realizowanymi w trakcie badań w obiekcie (il. 2b).



Il. 3. Model geometryczny kościoła pw. św. Pawła Apostoła

Ill. 3. Geometric model of the St. Paul Apostle's Church

W tabeli 2 zestawiono wartości pogłosowe współczynników pochłaniania dźwięku materiałów użytych do badań symulacyjnych i do adaptacji akustycznej wnętrza (według [6]). Kalibrację modelu geometrycznego przeprowadzono z użyciem charakterystyki czasu pogłosu zmierzonego oraz uzyskanego z badań symulacyjnych.

Tabela 2

Pogłosowe współczynniki pochłaniania dźwięku materiałów

Rodzaj materiału	Pogłosowy współczynnik pochłaniania dźwięku α					
	Częstotliwość [Hz]					
	125	250	500	1000	2000	4000
Stan istniejący						
tynk wapienny na murze	0,01	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04
drewno politurowane	0,05	0,04	0,03	0,03	0,04	0,04
marmur, granit	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
szkło okienne	0,35	0,25	0,18	0,12	0,07	0,04
publiczność	0,35	0,50	0,55	0,7	0,85	0,80
ławki drewniane proste	0,10	0,09	0,08	0,08	0,08	0,08
Materiały do adaptacji						
tynk celulozowy K13–16 mm	0,14	0,43	0,93	1,00	1,00	1,00
tynk celulozowy K13–38 mm	0,20	0,66	1,00	1,00	1,00	1,00
tynk celulozowy K13–50 mm	0,31	0,89	1,00	1,00	1,00	1,00

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

4. Adaptacja akustyczna obiektu

W celu adaptacji akustycznej przeprowadzonej na modelu kościoła jako materiał dźwiękochłonny zaproponowano natryskowe tynki celulozowe K13 firmy SonaSpray [6].

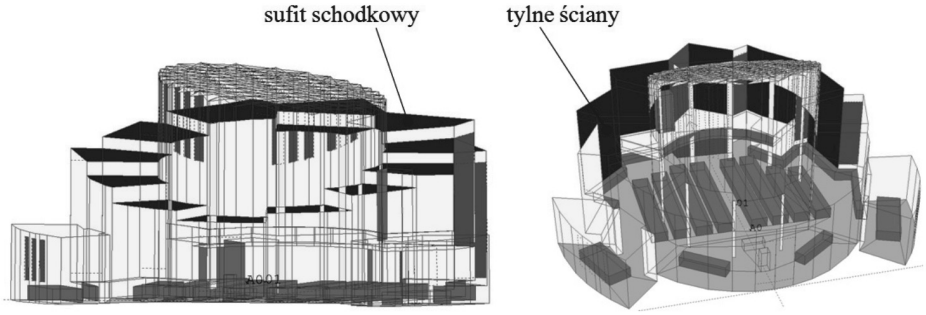
W tabeli 3 zaproponowano warianty adaptacji akustycznej z różną lokalizacją i grubością materiału K13 oraz z uwzględnieniem publiczności.

Tabela 3

Zestawienie zastosowanych wariantów adaptacji akustycznej wnętrza obiektu sakralnego

Wariant	Rodzaj materiału dźwiękochłonnego	Lokalizacja materiału w modelu kościoła	Pole powierzchni materiału dźwiękochłonnego m^2	Obecność publiczności
A	tynk celulozowy K13–16 mm	sufit schodkowy	587	N
B	tynk celulozowy K13–16 mm	sufit schodkowy	587	T
C	tynk celulozowy K13–16 mm	sufit schodkowy i ściany tylne	990	N
D	tynk celulozowy K13–16 mm	sufit schodkowy i ściany tylne	990	T
E	tynk celulozowy K13–38 mm	sufit schodkowy	587	T
F	tynk celulozowy K13–50 mm	sufit schodkowy	587	T
G	tynk celulozowy K13–50 mm	sufit schodkowy i ściany tylne	990	T

Na ilustracji 4 przedstawiono lokalizację materiałów dźwiękochłonnych umieszczonych na suficie schodkowym i ścianach tylnych. Dla wariantów A–G (tab. 3) przeprowadzono symulację parametrów akustycznych.

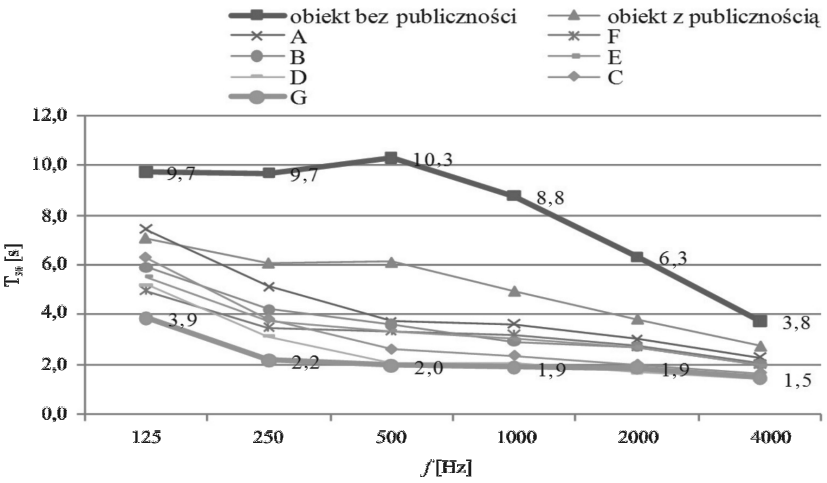


Il. 4. Rozmieszczenie materiałów dźwiękochłonnych w obiekcie

Ill. 4. Sound absorbing materials distribution in the object

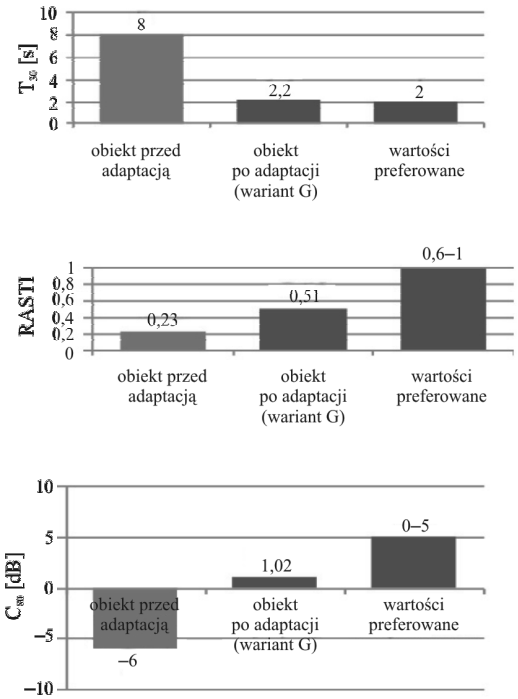
Na ilustracji 5 scharakteryzowano czas pogłosu w funkcji częstotliwości w pasmach oktawowych częstotliwości dla każdego wariantu rozwiązania w odniesieniu do charakterystyki czasu pogłosu modelu geometrycznego przed adaptacją bez publiczności i z publicznością.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ



Il. 5. Uzyskane z symulacji komputerowej charakterystyki częstotliwościowe czasu pogłosu modelu geometrycznego kościoła dla różnych wariantów adaptacji akustycznej

Ill. 5. The reverberation frequency characteristics obtained from computer simulation of church's geometric model for different variant of acoustics adaptation



Il. 6. Porównanie wartości parametrów akustycznych obiektu uzyskanych z badań symulacyjnych dla obiektu przed i po adaptacji z parametrami preferowanymi

Il. 6. The comparison of the acoustic parameters values of the object obtained from simulation tests before and after adaptation of the object and preferred ones

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Na ilustracji 6 pokazano rezultat adaptacji akustycznej kościoła z wykorzystaniem tynku celulozowego K13–50 mm (wariant G). Otrzymane parametry akustyczne odpowiadają wartościom zalecanym (il. 5).

Wskaźnik zrozumiałości mowy RASTI wynosi 0,5, co bez uwzględnienia instalacji nagłośnieniowej jest wartością zadowalającą. Podobnie, wskaźnik wyrazistości dla muzyki, wynoszący 1 dB, uległ znacznej poprawie i jego wartość mieści się w przedziale zalecanym (0–5 dB).

5. Wnioski

W artykule przedstawiono wyniki badań akustycznych wielofunkcyjnego współczesnego obiektu sakralnego. Z przeprowadzonych pomiarów akustycznych wynika, że wnętrze kościoła posiada nieodpowiednie warunki akustyczne do pełnienia swoich funkcji. Zmierzona, uśredniona wartość czasu pogłosu kilkukrotnie przekroczyła wartość preferowaną, co wpływa na słabą zrozumiałość mowy oraz kiepskie walory brzmienia muzyki.

Na podstawie obliczeń symulacyjnych stwierdzono, że uwzględnienie obecności publiczności wpływa w niewielkim stopniu na poprawę parametrów akustycznych. Adaptacja akustyczna w postaci natryskowych tynków celulozowych, pokrywających powierzchnie ścian tylnych oraz sufit schodkowy pomieszczenia dała pozytywne rezultaty. Uzyskano charakterystykę czasu pogłosu w funkcji częstotliwości zgodną z zaleceniami literatury. Znacznej poprawie uległy parametry dotyczące zrozumiałości mowy oraz jakości brzmienia muzyki. Zaproponowane rozwiązanie będzie miało również wpływ na działanie instalacji nagłośnieniowej, która w obiekcie bez adaptacji akustycznej nie spełnia właściwie swojej funkcji.

Artykuł opracowany został w ramach prac statutowych Katedry Mechaniki i Wibroakustyki AGH w latach 2010–2013, zadanie badawcze nr 3 – „Predykcja i badania doświadczalne nowych struktur w adaptacji akustycznej budowli”.

Literatura

[1] Engel Z., Engel J., Kosała K., Sadowski J., *Podstawy akustyki obiektów sakralnych*, Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji, Kraków–Radom 2007.
[2] Engel J., Kosała K., *Acoustic Properties of the Selected Churches in Poland*, Mechanics AGH, Vol. 24, No. 3, Kraków 2005, 173-181.
[3] Engel J., Kosała K., *Reverberation Indices in Acoustic Assessments of Sacral Structures*, Archives of Acoustics 29, l, 2004, 45-59.
[4] Fasold W., Kraak W., Schirmer W., *Taschenbuch Akustik*, tom II, Veb Verlag Technik, Berlin, 1984.
[5] Instrukcja obsługi programu CATT-Acoustics v8, 2002.
[6] Katalog tynków natryskowych SonaSpray K13 Standard.
[7] Kamisiński T., Kinasz R., Rubacha J., Kulowski A., *Badania doświadczalne i modelowe parametrów akustycznych wnętrza kościoła pw. Marii Magdaleny we Lwowie*, Materiały XII Polskiej Konferencji Naukowo-Technicznej: „Fizyka budowli w teorii i praktyce”, Politechnika Łódzka, Łódź 2009.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

[8] Kosała K., *Zagadnienia akustyczne w obiektach sakralnych*, praca doktorska, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków 2004.

[9] Kulowski A., Kamisiński T., Kinasz R., *Koncertowa funkcja kościoła pod wezwaniem św. Marii Magdaleny we Lwowie*, Materiały Międzynarodowego Seminarium: „Odnowa struktur miejskich w świetle zrównoważonego rozwoju", Politechnika Gdańska, Gdańsk 2005, 81-86.

[10] Kraak W., *Criteria for the Acoustical Design of Rooms*, Proceedings of the International Symposium on Subjective and Objective Evaluation of Sound, Poland, Poznań 1990.

[11] *RASTI Technical Review*, No. 3, Brüel & Kjaer Naerum, 1995.

[12] Sadowski J., *Akustyka w urbanistyce, architekturze i budownictwie*, Arkady, Warszawa 1971.

[13] Internetowy Serwis Lokalny Bochni@nin (www.bochnianin.pl – 30.10.2009).

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ