

ANDRZEJ KULOWSKI

AKU

STY

KASAL

**ZALECENIA PROJEKTOWE
DLA ARCHITEKTÓW**

GDAŃSK 2011

PRZEWODNICZĄCY KOMITETU REDAKCYJNEGO
WYDAWNICTWA POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ
Romuald Szymkiewicz

REDAKTOR PUBLIKACJI NAUKOWYCH
Janusz T. Cieśliński

RECENZENCI
Andrzej Dobrucki
Elżbieta Ratajczyk-Piątkowska

PROJEKT OKŁADKI
Katarzyna Olszonowicz

Wydanie I – 2007

Wydano za zgodą
Rektora Politechniki Gdańskiej

Oferta wydawnicza Politechniki Gdańskiej jest dostępna pod adresem
<http://www.pg.gda.pl/WydawnictwoPG>

© Copyright by Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej
Gdańsk 2011

Utwór nie może być powielany i rozpowszechniany, w jakiegokolwiek formie
i w jakikolwiek sposób, bez pisemnej zgody wydawcy

ISBN 978–83–7348–364–4

WYDAWNICTWO POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ

Wydanie II. Ark. wyd. 21,0, ark. druku 20,0, 103/663

Druk i oprawa: *EXPOL* P. Rybiński, J. Dąbek, Sp. Jawna
ul. Brzeska 4, 87-800 Włocławek, tel. 54 232 37 23

SPIS TREŚCI

AKUSTYKA SAL. Zalecenia projektowe dla architektów

WYKAZ OZNACZEŃ	9
PRZEDMOWA	11
1. DŹWIĘK W POMIESZCZENIU	15
1.1 Wprowadzenie	15
1.2. Fizyczna natura dźwięku	16
1.3. Właściwości słuchu człowieka	22
1.4. Zjawiska akustyczne w pomieszczeniach	27
1.4.1. Odbicie zwierciadlane	27
1.4.2. Odbicie rozproszone	28
1.4.3. Nakładanie się fal	31
1.4.4. Rezonans Helmholtza	33
1.4.5. Zanikanie dźwięku	39
1.5. Dźwięk powietrzny i materiałowy	42
1.6. Właściwości akustyczne materiałów budowlanych	43
1.6.1. Materiały konstrukcyjne i wykończeniowe	43
1.6.2. Współczynnik pochłaniania dźwięku	44
1.6.3. Ustroje akustyczne	48
1.6.4. Rozwiązania systemowe	49
1.7. Metody analizy pola akustycznego w pomieszczeniach	52
1.7.1. Metoda falowa	52
1.7.2. Metoda geometryczna	55
1.7.3. Metoda statystyczna	57
1.8. Czas pogłosu pomieszczenia	59
1.8.1. Chłonność akustyczna pomieszczenia	60
1.8.2. Formuły na czas pogłosu	60
2. AKUSTYCZNE PROJEKTOWANIE POMIESZCZEŃ	64
2.1. Wprowadzenie	64
2.2. Pomieszczenia o akustyce niekwalifikowanej	65
2.2.1. Echo	65
2.2.2. Pogłosowość	69
2.3. Pomieszczenia o akustyce kwalifikowanej	71
2.3.1. Pierwotna i wtórna struktura pomieszczenia	72
2.3.2. Funkcja i kubatura a czas pogłosu pomieszczenia	73
2.3.3. Kształt pomieszczenia	80

2.3.4. Profil sufitu i ścian	95
2.3.5. Układ widowni	110
2.3.6. Dobór foteli	123
2.3.7. Rozmieszczenie materiałów odbijających i pochłaniających dźwięk	135
2.3.8. Rozwiązania sprzyjające rozproszeniu dźwięku	138
2.3.9. Wpływ balkonów na akustykę sali	144
2.3.10. Akustyczne rozwiązanie sceny	158
2.3.11. Sale o regulowanej akustyce	183
2.3.12. Sale prób	195
2.3.13. Pomieszczenia techniczne	198
2.3.14. Przystosowanie akustyki pomieszczenia do nagłośnienia	199
2.4. Organizacja akustycznego projektu pomieszczenia	204
2.4.1. Projektowanie akustyczne a prawo budowlane	204
2.4.2. Wytyczne akustyczne do projektu budowlanego	205
2.4.3. Wytyczne akustyczne do projektu wnętrza	206
2.4.4. Realizacja projektu	206
2.5. Wpływ współczesnych stylów architektonicznych na akustykę sal	208
3. JAKOŚĆ AKUSTYCZNA SAL	217
3.1. Wprowadzenie	217
3.2. Subiektywna jakość akustyczna pomieszczeń	217
3.3. Metoda Beranka	218
3.3.1. Założenia metody	218
3.3.2. Kryteria oceny	219
3.3.3. Ograniczenia metody	224
3.4. Metoda Ando	225
3.4.1. Założenia metody	225
3.4.2. Kryteria oceny	228
3.5. Porównanie metody Beranka i metody Ando	228
3.6. Określanie jakości akustycznej pomieszczenia na etapie projektowania	229
3.6.1. Ocena jakości z wykorzystaniem symulacyjnych programów komputerowych	229
3.6.2. Ocena jakości z wykorzystaniem metody statystycznej	230
4. OCHRONA PRZECIWDŹWIĘKOWA SAL	236
4.1. Parametry akustyczne przegród budowlanych	236
4.1.1. Izolacyjność akustyczna od dźwięków powietrznych	236
4.1.2. Poziom uderzeniowy	239
4.1.3. Poziom dźwięku	240
4.2. Wymagania dotyczące ochrony przeciwdźwiękowej sal	241
4.3. Ochrona przed zakłóceniami przenoszonymi drogą powietrzną	243
4.3.1. Usytuowanie budynku względem zewnętrznych źródeł zakłóceń	243
4.3.2. Strefy akustyczne w budynku	243
4.3.3. Konstrukcja przegród budowlanych	247
4.4. Ochrona przed zakłóceniami przenoszonymi drogą materiałową	250
4.4.1. Konstrukcja i technologia budynku	250
4.4.2. Zapobieganie zakłóceniom instalacyjnym	254
4.5. Ochrona przeciwdźwiękowa pomieszczeń o akustyce niekwalifikowanej	257

4.6. Konsultacja akustyczna projektów branżowych	258
4.6.1. Systemy wentylacji sal	258
4.6.2. Usterki projektowe dotyczące wentylacji sal	260
5. PRZYKŁADY ZALECEŃ AKUSTYCZNYCH DO PROJEKTÓW ARCHITEKTONICZNYCH	264
5.1. Forma i zakres zaleceń akustycznych	264
5.2. Rozbudowa szkoły muzycznej	265
5.2.1. Podstawa, przedmiot i cel opracowania	265
5.2.2. Założenia projektowe	266
5.2.3. Konstrukcja przegród	268
5.2.4. Akustyka sali koncertowej	269
5.3. Adaptacja akustyczna hali sportowej	273
5.3.1. Podstawa, przedmiot i cel opracowania	273
5.3.2. Warunki akustyczne w hali przed adaptacją	274
5.3.3. Założenia projektowe	276
5.3.4. Obliczenia projektowe	277
5.3.5. Układ materiałów dźwiękochłonnych	279
5.3.6. Pomiary sprawdzające	281
5.4. Modernizacja sali widowiskowej teatru muzycznego	282
5.4.1. Podstawa, przedmiot i cel opracowania	282
5.4.2. Wymagania akustyczne	283
5.4.3. Analiza kształtu sali	284
5.4.4. Układ materiałów wykończeniowych	284
5.4.5. Obliczenia akustyczne	285
ZAKOŃCZENIE	288
ZAŁĄCZNIK 1	291
ZAŁĄCZNIK 2	302
BIBLIOGRAFIA	309
INDEKS	316

CONTENTS

ACOUSTICS OF HALLS. Design recommendations for architects

PREFACE	11
1. SOUND IN ENCLOSURE	15
1.1. Introduction	15
1.2. Physical nature of sound	16
1.3. Properties of human hearing	22
1.4. Acoustical phenomena in rooms	27
1.4.1. Mirror reflection	27
1.4.2. Diffuse reflection	28
1.4.3. Superposition of waves	31
1.4.4. Helmholtz resonance	33
1.4.5. Sound decay	39
1.5. Air-borne and structure-borne sound	42
1.6. Acoustical properties of building materials	43
1.6.1. Construction and finishing materials	43
1.6.2. Sound absorption coefficient	44
1.6.3. Sound absorbing structures	48
1.6.4. System solutions	49
1.7. Methods of sound field analysis in rooms	52
1.7.1. Wave method	52
1.7.2. Geometrical method	55
1.7.3. Statistical method	57
1.8. Reverberation time of a room	59
1.8.1. Acoustical absorption of a room	60
1.8.2. Formulae for reverberation time	60
2. ACOUSTICAL DESIGNING OF ROOMS	64
2.1. Introduction	64
2.2. Rooms of non-qualified acoustics	65
2.2.1. Echo	65
2.2.2. Reverberance	69
2.3. Rooms of qualified acoustics	71
2.3.1. Primary and secondary structure of a room	72
2.3.2. Reverberation time vs. function and volume of a room	73
2.3.3. Shape of a room	80
2.3.4. Profile of ceiling and walls	95
2.3.5. Profile and arrangement of audience	110

2.3.6. Influence of audience on acoustics of a room	123
2.3.7. Arrangement of sound reflecting and sound absorbing materials	135
2.3.8. Solutions favorable to sound diffusion	138
2.3.9. Influence of balconies on acoustics of a room	144
2.3.10. Acoustic solution of a stage	158
2.3.11. Rooms of variable acoustics	183
2.3.12. Rehearsal halls	195
2.3.13. Sound control rooms	198
2.3.14. Adaptation of room acoustics to public address system	199
2.4. Organization of acoustical project of a room	204
2.4.1. Acoustic designing vs. building code	204
2.4.2. Acoustical project of building	205
2.4.3. Acoustical project of interior	206
2.4.4. Realization of project	206
2.5. Influence of contemporary architectural styles on acoustics of halls	208
3. ACOUSTICAL QUALITY OF ROOMS	217
3.1. Introduction	217
3.2. Subjectively perceived acoustical quality of rooms	217
3.3. Beranek's method	218
3.3.1. Concept of the method	218
3.3.2. Criteria of valuation	219
3.3.3. Method restrictions	224
3.4. Ando's method	225
3.4.1. Concept of the method	225
3.4.2. Criteria of valuation	228
3.5. Comparison of Beranek's and Ando's methods	228
3.6. Defining the acoustical quality of a room at the designing stage	229
3.6.1. Quality valuation using simulation programs	229
3.6.2. Quality valuation using statistical method	230
4. NOISE CONTROL IN ROOMS	236
4.1. Acoustical parameters of partitions	236
4.1.1. Insulation against air-born sound	236
4.1.2. Impact sound level	239
4.1.3. Sound level	240
4.2. Requirements referring to noise protection of halls	241
4.3. Protection against air-borne sound	243
4.3.1. Location of buildings in reference to external sources of noise	243
4.3.2. Acoustical zones in buildings	243
4.3.3. Construction of partitions	247
4.4. Protection against structure-borne sound	250
4.4.1. Construction and technology of building	250
4.4.2. Protection against installation noise	254
4.5. Noise control in rooms of non-qualified acoustics	257
4.6. Acoustical consultation of branch projects	258
4.6.1. Ventilation systems of rooms	258
4.6.2. Defects in projects on the ventilation of rooms	260

5. EXAMPLES OF ACOUSTICAL RECOMMENDATIONS TO ARCHITECTURAL DESIGNS	264
5.1. Form and scope of acoustical recommendations	264
5.2. Extension of a school of music	265
5.2.1. Formal grounds, subject and goal of study	265
5.2.2. Design assumptions	266
5.2.3. Construction of partitions	268
5.2.4. Acoustics of concert hall	269
5.3. Acoustical adaptation of sports hall	273
5.3.1. Formal grounds, subject and goal of study	273
5.3.2. Acoustics in the hall before the adaptation	274
5.3.3. Design assumptions	276
5.3.4. Design calculations	277
5.3.5. Arrangement of sound absorbing materials	279
5.3.6. Post-completion measurements	281
5.4. Modernization of musical theatre hall	282
5.4.1. Formal grounds, subject and goal of study	282
5.4.2. Acoustical requirements	283
5.4.3. Analysis of a hall shape	284
5.4.4. Arrangement of finishing materials	284
5.4.5. Acoustical calculations	285
CONCLUSION	288
APPENDIX 1	291
APPENDIX 2	302
BIBLIOGRAPHY	309
INDEX	316

ε	– kąt widzenia sceny z widowni
Γ	– logarytmiczny dekrement tłumienia
φ_0	– kąt padania fali
φ	– kierunek biegu fali rozproszonej
$\phi(\tau)$	– funkcja autokorelacji
$\Phi_{lr}(\tau)$	– funkcja korelacji wzajemnej między sygnałem docierającym do lewego i prawego ucha
λ	– długość fali
ρ_0	– gęstość ośrodka
ω	– pulsacja, $\omega = 2\pi f$

PRZEDMOWA

Dla kogo jest ta książka

Akustyka pomieszczeń jest jednym z najbardziej rozwiniętych działów akustyki. Cyklicznie odbywają się konferencje specjalistyczne z tego zakresu oraz wydawane są liczne czasopisma fachowe. Zbiór opracowań książkowych w języku polskim i angielskim, czyli najbardziej dostępnych dla polskiego czytelnika, liczy co najmniej kilkanaście pozycji. Mogłoby się zatem wydawać, że pisanie kolejnego opracowania jest niepotrzebne. W zamysle architekta koncepcja każdego kolejnego obiektu i wynikający z niej projekt sali jest jednak oryginalnym, odmiennym od innych dziełem. Ogranicza to możliwość ujęcia procesu projektowania w postaci procedur gwarantujących powodzenie zarówno w zakresie architektury, jak i akustyki, gdyż prowadziłyby to do unifikacji powstających opracowań. Potrzeba naświetlenia z różnych stron zagadnień składających się na sztukę akustycznego projektowania sal pozostaje więc stale aktualna.

W książkach dotyczących akustyki pomieszczeń można wyróżnić dwa główne nurty. Pierwszy stanowią opracowania nastawione na matematyczno-fizyczny opis pola akustycznego w pomieszczeniu, zagadnienia pomiarów akustycznych, dyskusję parametrów akustycznych pomieszczenia itp. Akustyka pomieszczeń jest w tych opracowaniach zwykle traktowana jako wyspecjalizowana dziedzina analizy sygnałów. Kontekst architektoniczny, rozumiany z jednej strony jako studium korzyści akustycznych wynikających z określonych rozwiązań funkcjonalnych i architektonicznych, z drugiej zaś – analiza ograniczeń, jakie niosą przepisy budowlane oraz wymagania konstrukcyjne, materiałowe i estetyczne jest w nich zwykle eksponowany w mniejszym zakresie. Opracowania te są przeznaczone głównie dla czytelnika o przygotowaniu matematycznym lub technicznym, z reguły absolwenta wydziałów elektroniki lub fizyki uczelni politechnicznych lub uniwersyteckich. Opracowania takie mają jednak ograniczoną przydatność dla czytelnika o przygotowaniu architektonicznym, zwłaszcza jeśli jego zamiarem nie jest studiowanie akustyki architektonicznej jako wyodrębnionej dziedziny wiedzy, lecz poszukiwanie inspiracji w zakresie poprawnych pod względem akustycznym rozwiązań architektonicznych, dotyczących formy, wielkości i kształtu sali.

Drugim nurtem są albumy fotograficzne dotyczące sal o wybitnych walorach architektonicznych. Są to opracowania bliższe artystycznej stronie zawodu architekta, zaś wątek techniczny dotyczący akustyki zwykle jest tam mniej eksponowany. Książki o profilu lokującym się między tymi dwoma nurtami są w zdecydowanej mniejszości. Jednak właśnie one są najbardziej pomocne dla prac koncepcyjno-projektowych dotyczących akustyki pomieszczeń, a także wzajemnego zrozumienia odmiennych priorytetów, jakie mogą mieć współpracujący ze sobą architekt i akustyk. Taki właśnie jest zamysł niniejszej monografii, w której autor stara się spojrzeć na akustykę pomieszczeń od strony architekta, umieszczając fizykę zjawisk akustycznych powstających w pomieszczeniach w kontekście realiów

architektonicznych. W doborze materiału pomocne były prowadzone przez autora wykłady z akustyki architektonicznej na Wydziale Architektury Politechniki Gdańskiej oraz zajęcia na studium doktoranckim, a także konsultacje akustyczne przy prowadzonych pracach koncepcyjnych, projektowych i realizacji sal.

Myślą przewodnią książki jest udzielenie odpowiedzi na następujące pytania, stające przed architektem podczas opracowywania koncepcji, a następnie projektu sali:

- na jakim etapie projektowania obiektu mieszczącego salę należy zasięgnąć konsultacji akustycznych, aby nie dopuścić do powstania nieusuwalnych zaszczości rzutujących na akustykę sali,
- jakie racje kierują akustykiem formułującym wytyczne w poszczególnych etapach projektu architektonicznego,
- jakie korzyści i jakie niedostatki akustyczne pomieszczeń wynikają z określonych rozwiązań architektonicznych,
- jaką formę architektoniczną mogą przyjąć zalecenia w dziedzinie akustyki wnętrza sformułowane językiem akustyka i jaki zakres swobody projektowej w dziedzinie architektury one dopuszczają,
- co zyskuje projektowana sala po uwzględnieniu zaleceń akustycznych, a co traci w razie uznania, że walor architektoniczny ma wyższy priorytet niż akustyka sali, co jest dobrym prawem każdego architekta.

W powyższych pytaniach zawarta jest sugestia, że zalecenia w zakresie akustyki architektonicznej mogą stać w opozycji do rozwiązań architektoniczno-budowlanych. Tak jest w istocie – jak każda dziedzina techniki towarzysząca architekturze, również akustyka w pewnym stopniu ogranicza swobodę projektową architekta. W szczególności dotyczy to akustyki pomieszczeń, gdzie rozwiązania kształtujące akustykę sali zwykle mają mocno wyeksponowany wyraz wizualny. Niestety, często zdarza się, że dbając o suwerenność swoich decyzji architektonicznych projektant nie weryfikuje ich pod kątem akustycznym, licząc na to, że przypadkowo uformowana, „wynikowa” akustyka spełni wymagania związane z funkcją i komfortem użytkowania pomieszczenia. Praktyka pokazuje, że nie jest to pogląd słuszny. W tym kontekście celem książki jest uświadomienie architektowi, że poza oczywistym faktem, iż prawidłowo zaprojektowana akustyka pomieszczenia może istotnie wpłynąć na jego walory użytkowe, jednym ze źródeł inspiracji przy kształtowaniu sal może być znajomość właściwości słuchu człowieka oraz praw rządzących rozprzestrzenianiem się dźwięku w pomieszczeniach.

Książka jest przeznaczona dla architektów, inżynierów budownictwa projektujących pomieszczenia, zwłaszcza sale w obiektach użytku publicznego, przedstawicieli dziedzin, które mają wpływ na efektywność przekazywania dźwięku ze sceny do sali, jak technicy teatru, scenografowie, a także reżyserzy i sami wykonawcy. Książka może być również użyteczna dla studentów wydziałów architektury i budownictwa oraz dla słuchaczy studiów doktoranckich na tych kierunkach. Dla przybliżenia czytelnikowi fachowej terminologii anglojęzycznej, spis treści i podpisy pod rysunkami podano również w języku angielskim.

Ze względu na taki profil potencjalnego czytelnika, w książce pominięto rozważania matematyczne z zakresu fizyki dźwięku, poza podstawowymi wiadomościami przydatnymi podczas projektowania. Również zagadnienia dotyczące technicznej strony akustyki pomieszczeń, w tym pomiary akustyczne oraz ochrona przeciwdźwiękowa, są przedstawione skrótowo bądź w formie komentarza do konkretnie omawianego problemu z zakresu akustyki pomieszczeń. Z tych samych powodów ograniczono listę omawianych parametrów akustycznych, pomijając te, na które projektant-architekt nie ma wpływu. Wiadomości te

w poszerzonym zakresie można znaleźć w większości podręczników specjalistycznych przeznaczonych dla konsultantów akustycznych o profilu pomiarowo-matematycznym.

Adresatami książki są również współpracujący z architektami akustycy. Ważne jest tu uświadomienie akustykowi, że za salę jako za całość odpowiada główny projektant, którym jest architekt. Odpowiedzialność ta obejmuje także sposób i zakres wykorzystania elementów zawartych w projektach branżowych, w tym w projekcie akustycznym. Rozwiązania składające się na projekt akustyczny sali mają szczególnie bliski związek z jej wyrazem architektonicznym, stąd naturalne jest przyjęcie przez architekta priorytetów odmiennych od priorytetów akustyka. Uświadomienie obu stronom celowości poszukiwania wspólnie akceptowanych rozwiązań z myślą o przyszłym użytkowniku obiektu jest główną ideą niniejszej pracy.

Informacja dotycząca drugiego wydania

Drugie wydanie książki, przygotowane ok. czterech lat po wyczerpaniu nakładu pierwszego wydania, zostało w znacznym stopniu rozszerzone i uzupełnione. Główny kierunek zmian dotyczył włączenia do książki przykładowych ekspertyz i skrótów opracowań projektowych, czemu został poświęcony odrębny, nowy rozdział. Intencją autora było ułatwienie czytelnikowi, nie będącemu praktykującym konsultantem akustycznym, samodzielnego wykonywania prostszych opracowań z zakresu akustyki pomieszczeń.

W porównaniu z pierwszym wydaniem, najistotniejsze zmiany są następujące:

— dodano rozdziały:

2.3.1. Pierwotna i wtórna struktura pomieszczenia,

2.5. Wpływ współczesnych stylów architektonicznych na akustykę sal,

4.6.1. Systemy wentylacji sal,

4.6.2. Usterki projektowe dotyczące wentylacji sal,

5. Przykłady zaleceń akustycznych do projektów architektonicznych;

— znacznie rozszerzono treść kilku rozdziałów m.in.:

2.3.4. Profil sufitu i ścian,

2.3.6. Dobór foteli;

— dokonano wielu przeredagowań i uzupełnień tekstu, wymieniono nieaktualne ilustracje i dodano ok. 50 nowych, zaktualizowano odniesienia do norm i przepisów, rozszerzono bibliografię o ok. 40 pozycji.

W wyniku tych zmian, objętość tekstu zwiększyła się o ok. 60 stron.

