

МІНІСТЕРСТВО КУЛЬТУРИ ТА ІНФОРМАЦІЙНОЇ ПОЛІТИКИ УКРАЇНИ

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ТЕАТРУ, КІНО І ТЕЛЕБАЧЕННЯ ІМЕНІ І. К. КАРПЕНКА-КАРОГО**

Інститут екранних мистецтв

Кафедра Звукорежисури

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на здобуття другого (магістерського) рівня вищої освіти
на тему
«Вплив акустики приміщень на якість звуку при проведенні концертів»

Студента 2-м курсу ЗВР групи
Освітньої програми Звукорежисура
Спеціальності 021 Аудіовізуальне
мистецтво та виробництво
Галузі знань 02 Культура і мистецтво
Ступеня вищої освіти магістр
РОЇКА Ігора Ярославовича
Науковий керівник кандидат наук, доцент
КУЩ Євген Вадимович

Київ – 2024

ЗМІСТ

ВСТУП.....	3
РОЗДІЛ 1. ОСНОВНІ ТЕОРІЇ, ЯКІ ОПИСУЮТЬ ПРОЦЕСИ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ АКУСТИЧНИХ ХВИЛЬ В ПРИМІЩЕННІ.....	5
1.1. Історичні передумови виникнення архітектурної акустики.....	5
1.2. Статистична теорія.....	8
1.3. Геометрична (променева) теорія.....	19
1.4. Хвильова теорія.....	29
1.4.1. Коефіцієнт поглинання з позицій хвильової теорії.....	33
Висновки до розділу.....	34
РОЗДІЛ 2. ЗВУКОПОГЛИНАЮЧІ МАТЕРІАЛИ І КОНСТРУКЦІЇ.....	36
2.1. Пористі матеріали.....	36
2.2. Резонансні поглиначі.....	37
Висновки до розділу.....	39
РОЗДІЛ 3. ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ І ВИДИ СИСТЕМ ЗВУКОПІДСИЛЕННЯ В ПРИМІЩЕННЯХ.....	40
Висновки до розділу.....	44
РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ АКУСТИКИ ПРИМІЩЕНЬ.....	46
4.1. Київський академічний театр оперети.....	46
4.2. Літній театр у Бучанському міському парку, м. Буча.....	48
ВИСНОВКИ.....	49
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	52

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасному звукорежисеру у практичній діяльності доводиться працювати в різному акустичному середовищі: це можуть бути театри, концертні зали, відкриті майданчики. Робота в кожній такій локації має свої специфічні вимоги до налаштування систем та пристроїв звукопідсилення при проведенні заходів. Прибуваючи на новий для себе майданчик, звукорежисеру потрібно швидко визначити необхідну потужність системи звукопідсилення, оптимальні місця розташування акустичних систем, проблемні місця, притаманні даному приміщенню і т. д.

Окремим питанням завжди стоїть облаштування сценічного простору, оскільки вимоги до акустики приміщення, актуальні для слухачів і для виконавців, суттєво різняться. В зоні навколо мікрофонів краще забезпечити посилене звукопоглинання, а нестачу реверберації компенсувати шляхом застосування електронних процесорів просторової обробки.

Оскільки звукорежисер не може змінювати вже існуючий простір, йому доводиться підлаштовуватися під конкретні зовнішні умови, їх акустичні якості. У зв'язку з цим йому необхідно знати і розуміти основні положення акустики приміщень і застосовувати їх при вирішенні завдань, що виникають.

Акустиккою приміщень займається архітектурна акустика - наука, що вивчає поширення звукових хвиль у закритих приміщеннях, відбиття і поглинання їх поверхнями, вплив відбитих хвиль на чутність мови і музики.

Актуальність проблеми полягає в тому, що навіть у приміщеннях з правильно обраними формою та лінійними розмірами виявляються недоліки звучання, усунення яких займає багато часу, сил та засобів.

Мета: визначити вплив приміщень на якість звуку при проведенні заходів, застосовуючи теорії архітектурної акустики.

Завдання: висвітлити основні положення статистичної, геометричної та хвильової теорій.

Об'єкт дослідження: архітектурна акустика.

Предмет дослідження:

- глядацька зала національного академічного театру Оперети, м. Київ;
- літній театр у Бучанському міському парку, м. Буча.

Новизна роботи полягає в тому, що проаналізовані конкретні приміщення з застосуванням методів архітектурної акустики, що збагачує джерельну базу при виборі найбільш оптимального майданчика для проведення того чи іншого заходу.

Апробація результатів магістерської роботи. Отримані теоретико-методологічні та практичні положення доповідались та обговорювались на Студентській онлайн-конференції "АКТУАЛЬНІСТЬ ТА ПРОБЛЕМАТИКА ВИБОРУ ТА НАПИСАННЯ МАГІСТЕРСЬКИХ КВАЛІФІКАЦІЙНИХ РОБІТ В УМОВАХ ВІЙНИ" (м. Київ, Київський національний університет театру, кіно і телебачення імені І.К. Карпенка-Карого (КНУТКІТ), 30 листопада 2023 р.)

РОЗДІЛ 1

ОСНОВНІ ТЕОРІЇ, ЯКІ ОПИСУЮТЬ ПРОЦЕСИ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ АКУСТИЧНИХ ХВИЛЬ В ПРИМІЩЕННІ

1.1. Історичні передумови виникнення архітектурної акустики

Архітектурна акустика є однією з найдавніших наук. Акустичні завдання в ті часи ставилися і вирішувалися у зв'язку з будівництвом гігантських, спочатку культових, а пізніше й інших громадських споруд-залів для зборів та видовищ. Зодчі Ассирії, Вавилону, Стародавнього Єгипту в V-II тисячоліттях до н. е. будували храми, що мали виразну архітектуру і вражаюче художнє оздоблення. І потужні будівельні конструкції, і скульптури, і живопис - все було спрямоване на те, щоб вразити і придушити психіку людей, які прийшли до храму помолитися, створити у них відчуття своєї нікчемності, містичного страху перед божественними силами. Стародавнім будівельникам, мабуть, вже були відомі закони поширення та відображення звукових хвиль. Користуючись ними, вони досягали акустичних ефектів, що вражали уяву тих, хто молиться.

На відміну від Стародавнього Єгипту, в основі мистецтва Стародавньої Греції (VII - IV ст. до н. е.) лежало уявлення про силу і красу людини, її нерозривний зв'язок з навколишньою природою та суспільним середовищем. Давнім грецьким храмам та іншим громадським спорудам властива пропорційність частин, вона визначила їх високі акустичні якості. Поряд із храмовими будинками приділялася велика увага спорудам громадського призначення. Видовищні споруди Стародавньої Греції поділялися на два види:

одеони та театри. Перші являли собою порівняно невеликі криті будівлі призначені для музичних, вокальних і декламаторських змагань, за формою близькими до театрів. Другі були видовищними спорудами відкритого типу та великої місткості на тисячі та десятки тисяч осіб. Кам'яні лави глядацьких місць розташовувалися на схилах пагорбів. Раціональність прийнятих давніми греками акустичних рішень була згодом підтверджена наукою нашого часу.

Традиції грецьких архітекторів були продовжені їх римськими послідовниками у VII-I ст. до нашої ери. Римські театри були подібні до грецьких, хоча на відміну від них будувалися не тільки на природних схилах, але і на горизонтальних ділянках. Типовим прикладом такого театру є амфітеатр Флавія – Колізей, який вмщував, по сучасних оцінках, до 50 тис. глядачів, побудований у 80-90 рр. н. е. [9].

В наш час потрібне встановлення систем звукопідсилення навіть у залах місткістю 200-300 осіб. Тому здаються фантастичними свідчення істориків про місткість стародавніх грецьких і римських театрів, що обслуговувалися природною звучністю голосів акторів. Так, театр Помпея вмщував 11600 чоловік, театр Марцелла в Римі – 17580. Якщо навіть ці дані сильно перебільшені, а за сучасними оцінками названі театри вмщали відповідно 5 і 7 тис. осіб, то здається дивом, що у цих гігантських театрах досягали задовільної гучності на слухацьких місцях. Залишається припустити: або вуха тодішніх відвідувачів видовищ були в кілька разів чутливіші, ніж у сучасних слухачів, або стародавні будівельники знали невідомі нам секрети, що дозволяли отримати достатню гучність і розбірливість на слухацьких місцях. Так чи інакше, але загальний рівень шуму в сучасному, навіть невеликому місті, набагато вищий, ніж в ті часи. Та й люди в наш час вже звикли, а точніше пристрастилися до гучної музики, сучасному слухачу вже не цікаво напружувати свій слух і дослуховуватися до тихої музики чи співу під час вистав або на концерті, особливо коли вони відбуваються в великих приміщеннях. Необхідно зауважити, що вже і тоді вживали різних заходів, щоб якось підсилити звук. Відомо, що в маски акторів, що зображують різні

емоції дійових осіб, було вбудовано рупори, що спрямовували звук у бік глядачів. Особливу роль у посиленні та збагаченні звучання в давньогрецьких та давньоримських театрах грали так звані «гармоніки»: системи резонаторів у вигляді бронзових циліндричних ємностей і глиняних амфор. Вони розташовувалися в нішах стіни за глядацькими місцями і під лавами.

Вітрувій у «Десяти книгах про архітектуру» узагальнив досвід античних архітекторів та сформулював низку положень, які є геніальним передбаченням та використовуються при будівництві сучасних театрів. Наші далекі предки мали ясне уявлення про роль прямого звуку, небезпеку пізніх відображень, здатних викликати відлуння, та про «порушення будови звукових хвиль», викликаних відбиттям звуків від перешкод [9].

Античні знання про акустику приміщень знайшли практичне застосування при спорудженні культових будівель раннього та пізнього середньовіччя. У католицьких храмах створювалося враження музики, що ллється з небес. Це не випадкова знахідка будівельників, а свідоме використання особливих архітектурних форм та продумане розташування духового органу та хору.

Своєрідні акустичні ефекти закладені в конструкцію деяких православних храмів. Ефект відображення голосів священника і хору від купольної частини споруд вниз до тих, хто молиться, з виникненням відчуття спілкування з небом відомий, напевно, будь-кому. Для створення бажаного акустичного середовища будівельники закладали у стіни та склепіння храмів глиняні глеки різних розмірів, так звані «голосники», які відігравали роль акустичних резонаторів.

У 18 та на початку 19 ст. увагу стали приділяти спорудженню концертних та театральних залів. Розвивалося синтетичне музичне мистецтво - опера. Розумним вибором геометричної форми, розмірів, продуманим розміщенням звукопоглинаючих матеріалів у цих залах створювали добрі умови для слухачів та виконавців - співаків, музикантів. У 19 ст. з не зовсім чітких уявлень античного світу стали викристалізовуватися точні знання.

Ейлер, Лагранж, Фур'є, Стокс, Юнг, Гельмгольц, Дж. Стретт (останній відоміший під ім'ям лорда Релея) створили акустику як науку. Наприкінці 19 та на початку 20 ст. У. Себін (Wallis Sabine) виконав експерименти, що започаткували теорію архітектурної акустики, виявив кількісні зв'язки між геометричними параметрами приміщень та їх акустичними характеристиками [9].

До початку 20 ст. головну увагу в акустиці приміщень приділяли аналізу напрямів шляхів поширення потоків звукової енергії в приміщенні - прямого та відбитого від перешкод, інакше кажучи, розгляду геометричної (променевої) картини. *Геометрична теорія* - найдавніша. Вона успішно застосовується і в наш час, особливо при проектуванні залів великої місткості.

У. Себін запропонував *статистичну теорію*. Він розглядав акустичні процеси у приміщенні після вимкнення джерела звуку, як запізнення багаторазово відбитих хвиль та їх поступове ослаблення внаслідок поглинання енергії перешкодами. Вихідною причиною цього процесу є енергія, надана приміщенню джерелом звуку.

Теорія У. Себіна, попри великі практичні успіхи, викликала серйозну критику. У 1929 р. Шустер (K. Schuster) і Ветцман (E. Waetzmann) визнали трактування статистичної теорії незадовільним. Вони вважали, що після припинення дії джерела звуку процес згасання відбувається не під впливом вимушених коливань, а як результат згасання власних (резонансних) коливань, збуджених джерелом звуку, та з частотами, що визначаються формою та розмірами приміщення. Така теорія, названа *хвильовою*, була фундаментально розвинена Болтом, Морзом, Дрейзенем, Фурдуєвим та іншими [9].

1.2. Статистична теорія

Коли джерело звуку працює в замкнутому приміщенні, то відбувається складний процес формування звукового поля в ньому - за рахунок відбиття від

стін, стелі, підлоги і т. д. При цьому звукова енергія частково поглинається в повітрі, у стінах та різних предметах, що знаходяться в приміщенні, а також за рахунок проходження звуку у зовнішнє середовище. Крім того, має місце процес дифракції звукових хвиль за наявності різних перешкод порівняно невеликих розмірів всередині приміщення: колон, екранів, крісел і т. д. Вплив приміщення на звуковий сигнал можна розглядати, як його обробку спеціальним просторовим фільтром. Приміщення створює лінійну фільтрацію сигналу, в результаті якої змінюється його структура і АЧХ [1].

В архітектурній акустиці більша увага приділяється не стаціонарному процесу (процесу коливань, що встановилися), а перехідному (нестационарному). Останній починається після припинення дії джерела звуку і полягає в поступовому спаді звучання внаслідок втрат звукової енергії і називається *відзвуком*, або *реверберацією*. Характер цього процесу залежить від розмірів і форми приміщення, від звукопоглинаючих властивостей поверхонь у ньому. Чим більше поглинається звук, тим коротший час реверберації.

Реверберація суттєво впливає на якість звучання і мови, і музики. Надмірна тривалість реверберації призводить до того, що нові склади мови звучать на тлі попередніх складів, що загасають. Розбірливість мови при цьому погіршується. При короткому відзвуку розбірливість мови цілком задовільна, але своєрідна «стерильність» такого звучання сприймається так само, як недолік, особливо при художньому читанні. Ще більше значення процес відлуння має під час прослуховування музики. Кожна музична фраза є послідовністю звукових імпульсів. Затягнутий відзвук порушує естетичність сприйняття музики тим сильніше, чим швидше темп виконання, оскільки звуки «набігають» один на одного. Навпаки, за дуже короткого відлуння або його відсутності, наприклад, при виконанні на відкритому повітрі, музика звучить сухо, втрачається злитість звучання. Лише при певному, цілком визначеному для кожного стилю виконання, часу реверберації утворюється необхідна зв'язність звучання, що створює найкращий естетичний результат.

Розглянемо процеси, що виникають у приміщенні під час звучання джерела I (рис. 1.1). Першим в точку прийому Pr , де знаходяться вуха слухача або мікрофон, приходить шляхом 1 прямий звук, потім по шляху 2 звуку, відбиті від найближчих до джерела поверхонь, далі звуку по шляху 3, відбиті від віддалених поверхонь. Пізніше приходять звуки, які зазнали дворазових відображень на шляху 4 і т. д. При кожному відображенні частина енергії поглинається, а частина приходить у точку прийому і накладається на прямий звук. Кількість відображень за одиницю часу зростає пропорційно другого ступеня часу. Приміщення поступово заповнюється звуковою енергією і відбувається поступовий процес наростання її щільності в даній точці. Оскільки за рахунок поглинання відбиті звуки приходять усе з меншим рівнем енергії, то через деякий проміжок часу, названий *часом атаки*, настає режим, що встановився.

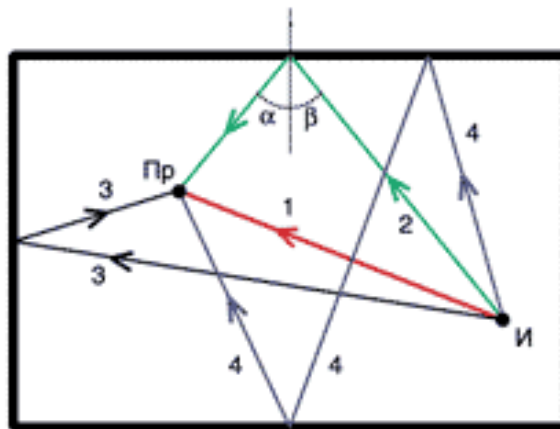


Рис. 1.1. Прямий та відбиті сигнали [13].

У цьому режимі джерело звуку працює та поповнює ту частину енергії, яка поглинається, наприклад, стінами, меблями, повітрям, тому в приміщенні рівень щільності енергії встановлюється постійним. Після припинення звучання джерела починається процес відлуння. У тій же послідовності, як і на початку звучання, спочатку в точку прийому приходять порівняно рідкісні початкові відображення. Далі щільність запізнілих імпульсів збільшується, а їх енергія поступово спадає (рис. 1.2).

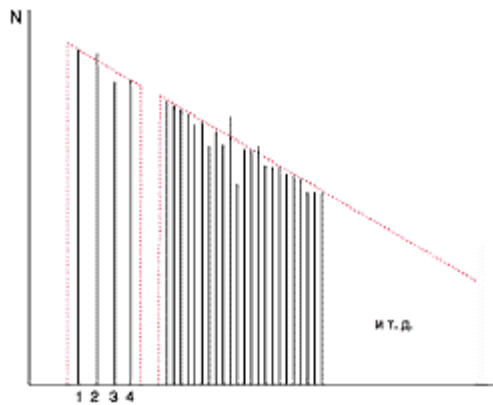


Рис. 1.2. Структура ранніх відображень ревербераційного відзвуку [13].

Таким чином, можна виділити три фази в процесі формування звукового поля в будь-якому приміщенні: період встановлення (атака), стаціонарний період, період спаду (реверберація). Від співвідношення цих періодів за тривалістю, а також від структури відбитих звуків (їх кількості, співвідношення амплітуд, напрямків приходу та ін.) у слухачів і формуються суб'єктивні відчуття «акустики» зали, тобто відчуття просторовості, балансу, повноти і т. д.

Оскільки будь-який музичний або мовний сигнал має свої періоди наростання, встановлення та спаду, а процеси формування звукового поля в приміщенні накладають додатково на нього свої процеси атаки, встановлення та післязвучання, які особливо чітко чути в паузах під час виконання музичних творів, це призводить до зміни тембру звучання будь-якої мови, музики чи співу. Достатньо порівняти сприйняття будь-якого музичного твору на відкритому просторі (стадіоні або відкритій естраді), у концертному залі, або в невеликому сильно приглушеному приміщенні.

Статистична теорія займається саме цією, другою частиною відзвуку з щільністю імпульсів, що збільшується в часі, та їхньою енергією, яка зменшується. Акустичні процеси у приміщенні розглядаються як поступовий спад енергії багаторазово відбитих перешкодами хвиль. Цей спад відбувається після припинення дії джерела звуку. Прямий звук і початкові, порівняно рідкісні, відображення статистичною теорією не беруться до уваги.

Ідеалізуючи, вважають цей процес у першому наближенні безперервним. Тоді його можна зобразити в лінійному вигляді експонентою (рис. 1.3),

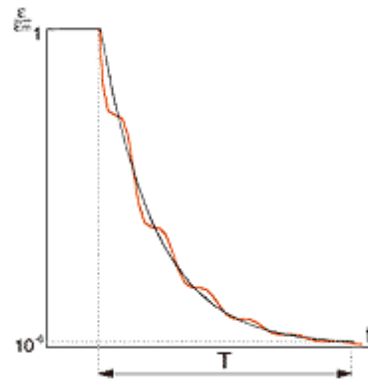


Рис. 1.3. Процес спаду звукової енергії [13].

а в напівлогарифмічному – прямою лінією (рис. 1.4).

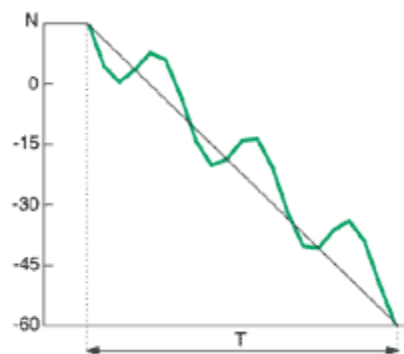


Рис. 1.4. Процес спаду звукової енергії в напівлогарифмічному вигляді [13].

Метод, запропонований У. Себіном, заснований на моделі ідеального приміщення, в якому звукове поле після припинення дії звукового сигналу може бути розраховане на основі статистичного розгляду процесу згасання звуку. При цьому вважається, що амплітуди і фази відбитих звукових хвиль розподілені хаотично, тобто у хвильовому русі немає переважаючих напрямків потоків і симетрії у розподілі амплітуд: звукове поле ізотропне і середня за часом щільність звукової енергії у будь-якій точці приміщення теж однакова. Таке звукове поле називається *дифузним*. Кількісною мірою оцінки дифузності звукового поля в приміщенні є *індекс дифузності*:

$$I_d = 1 - \frac{m}{m_0},$$

де m – відносне відхилення інтенсивності звуку, усереднене по всім напрямкам;

m_0 – відносне відхилення інтенсивності звуку, виміряне в заглушеній камері. При $m = m_0$ (повністю заглушене приміщення) індекс дифузності дорівнює нулю. Якщо $m = 0$, то поле абсолютно дифузне. Для більшості приміщень середнє значення індексу дифузності складає 0,65 – 0,75. Зі збільшенням об'єму приміщення ($V > 10000 \text{ м}^3$) індекс дифузності зменшується. Його збільшують, застосовуючи в приміщенні різні по формі об'ємні конструкції, які розсіюють звук [9]. При кожному відображенні частина падаючої енергії поглинається перешкодами і перетворюється на тепло. Розгляд такого дифузного поля дав можливість знехтувати явищами інтерференції та застосувати при розрахунках енергетичне підсумовування.

Реальне звукове поле в приміщенні можна наближено вважати дифузним тільки якщо енергія відбитих хвиль перевищує енергію прямих. Для цього в приміщенні повинні бути добре відбиваючі поверхні різних форм і розмірів, що забезпечують прихід у кожную точку поля великої кількості відбитих звуків з різних напрямків простору. Прикладом такого приміщення може служити ревербераційна камера, тобто кімната з жорсткими непаралельними стінками різних форм та розмірів, що використовується для проведення вимірювань [1].

Для експериментального визначення часу реверберації У. Себін користувався найпростішими пристроями: органічними трубами як джерелом звуку, та секундоміром. Він виявив, що час реверберації T прямо пропорційний об'єму приміщення V і обернено пропорційний добутку середнього коефіцієнта поглинання $\alpha_{\text{сеп.}}$ і площі всіх перешкод S :

$$T = \frac{kV}{\alpha_{\text{сеп.}}S}.$$

Коефіцієнт поглинання визначається як відношення поглинутої енергії до енергії, що падає на дану поверхню:

$$\alpha = E_{\text{погл.}} / E_{\text{пад.}}$$

В загальному випадку коефіцієнт поглинання залежить від кута падіння на поверхню, але в дифузному полі передбачається, що кількість відображень в одиницю часу велика і напрямки падіння звукової хвилі рівномірні, тому можна ввести поняття *середній коефіцієнт поглинання*.

Якщо в приміщенні є кілька різних поверхонь S_i (оштукатурені стіни, килими, дерев'яні підлоги та ін.), кожна зі своїм коефіцієнтом поглинання α_i , а також деяка кількість предметів N_i (крісел, інструментів, людей та ін.), у яких свої коефіцієнти поглинання α_N , можна визначити загальне поглинання в приміщенні:

$$A = \alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \alpha_3 S_3 \dots + \alpha_{N_i} N_i.$$

Звідси середній коефіцієнт поглинання у приміщенні:

$$\alpha_{\text{сеп.}} = \alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \alpha_3 S_3 \dots + \alpha_{N_i} N_i / S = A / S,$$

де $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3 \dots$ - коефіцієнти поглинання різних матеріалів;

$S = S_1 + S_2 + S_3 \dots$ - загальна площа перешкод.

З цього виразу можна зробити висновок, що середній коефіцієнт поглинання відповідає єдиному матеріалу, яким можна було б покрити всі поверхні перешкод приміщення зі збереженням загального звукопоглинання:

$$A = \alpha_{\text{сеп.}} S.$$

Він вимірюється в особливих одиницях, *себінах (Сб)*. Коефіцієнт поглинання, що дорівнює одному себіну, відповідає поглинанню звуку відкритим вікном площею 1 м² [1].

Згідно з отриманим часом реверберації в п'яти різних приміщеннях у формі прямокутного паралелепіпеда і об'ємами від 96 до 1960 м³ У. Себін прийняв значення $k = 0,164$. При теоретичному виведенні формули для розрахунку часу реверберації було отримано значення $k = 0,161$. В подальшому було виявлено, що k відрізняється для приміщень різної форми, а отже форма приміщення впливає на значення часу реверберації. Справа в тому, що від співвідношення лінійних розмірів приміщення залежить середня

довжина пробігу між двома відображеннями $l_{\text{сер.}}$, отже, залежить і час реверберації T .

Оскільки в дифузному полі кожна звукова хвиля зазнає багаторазових відображень від поверхонь приміщення, можна ввести таке поняття, як *середній час між двома відображеннями звуку τ* . Воно може бути статистично визначене:

$$\tau = 4V / CS,$$

де V - об'єм приміщення;

S - площа всіх поверхонь (стін, підлоги, стелі) приміщення;

C - швидкість звуку.

Звідси можна визначити середню кількість відображень в одиницю часу:

$$n = 1 / \tau = CS / 4V.$$

Крім того, це дозволяє визначити середню довжину вільного пробігу:

$$l_{\text{сер.}} = C \tau = 4V / S.$$

Ці формули спочатку були отримані для приміщень прямокутної форми, з лінійними розмірами, близькими до «золотого перерізу», коли довжина L , ширина B і висота H пов'язані співвідношенням $L / B = B / H$ при $L = B + H$ і приблизно зберігаються також для приміщень більш складних форм.

В роботах К. Ейрінга (Carl F. Eyring) було показано, що звукова енергія поглинається перешкодами не безперервно, а стрибками, по мірі досягнення хвилею тієї чи іншої поверхні, через проміжки часу, що дорівнюють середньому часу пробігу звукової хвилі. Для кількісного опису процесів згасання енергії в різних приміщеннях було введено параметр *стандартний час реверберації* - інтервал часу T (с), протягом якого щільність звукової енергії зменшується в 10^6 разів в порівнянні з початковою, при цьому її рівень знижується на 60 дБ [1]. Для його розрахунку Ейрінг отримав формулу:

$$T = \frac{0,161V}{-S \ln(1 - \alpha_{\text{сер.}})},$$

де V – об'єм приміщення;

S – площа внутрішніх поверхонь;

$\alpha_{\text{сер.}}$ – середній коефіцієнт поглинання.

При невеликих коефіцієнтах поглинання ($\alpha_{\text{сер.}} < 0,2$) цей вираз може бути спрощений і представлений у вигляді формули Себіна:

$$T = \frac{0,161V}{\alpha_{\text{сер.}}S}$$

Обидві ці формули широко використовуються при оцінці акустичних характеристик різних приміщень (студій, концертних залів і т. д.). Слід зазначити, що вони не враховують вплив форми приміщення, місця розташування звукопоглиначів і дають дещо завищені значення часу реверберації, але, незважаючи на наближений характер, дозволяють отримати прийнятну для практичних розрахунків точність [1].

Коефіцієнти поглинання матеріалів визначають вимірами в ревербераційній камері. Позначимо об'єм камери через V , та її час реверберації через T_0 . Після внесення до камери досліджуваного матеріалу з площею S_M час реверберації зменшується до T_M . Тоді:

$$\alpha = \frac{1}{6} \times \frac{V}{S_M} \times \left(\frac{1}{T_M} - \frac{1}{T_0} \right).$$

Якщо площа досліджуваного предмета (наприклад, столу, крісла тощо) не може бути виражена певним числом, знаходять поглинання предмету:

$$A = \frac{V}{6} \times \left(\frac{1}{T_M} - \frac{1}{T_0} \right).$$

Отже, за допомогою формул Себіна та Ейрінга вирішують зворотнє завдання: визначають α або A за виміряним часом реверберації.

Пауль Себін (Paul Sabine) – двоюрідний брат У. Себіна – у 1929 р. помітив, що вологість повітря у вимірювальній камері впливає на час реверберації на частотах понад 2 кГц. Ервін Майєр (Erwin Meyer) виявив той самий ефект для частот вище 3,2 кГц. Точніше дослідження цього явища було зроблено в 1931 р. Верном Кнудсеном (Vern Knudsen). Він визначив, що поглинання звуку в сухому повітрі більше, ніж у вологому, і на верхніх звукових частотах більше, ніж на нижніх. Тільки тоді, коли відносна вологість

стає 100% і з'являється туман, поглинання звуку в повітрі дуже збільшується і вже для усіх частот. Поглинання звуку викликане в'язкістю та теплопровідністю повітря, а також молекулярними втратами. Воно стає помітним на частотах понад 2 кГц у приміщеннях об'ємом понад 2000 м³ і росте приблизно пропорційно квадрату частоти [13].

Враховуючи це, до формул необхідно внести наступні поправки:

$$T = \frac{0,161V}{-S \ln(1-\alpha_{\text{сеп.}}) + 4\mu V},$$

де μ - показник згасання в повітрі:

$$\mu = 52,5 \frac{f^2}{c\rho} \eta,$$

який залежить від частоти f , щільності ρ та в'язкості η повітря, а отже збільшується з ростом частоти звуку, і зменшенням вологості повітря; c – швидкість звуку в повітрі.

Таким чином, час стандартної реверберації залежить від об'єму приміщення, середнього коефіцієнта поглинання та площі його внутрішніх поверхонь, частоти звуку, а також температури та відносної вологості повітря в ньому.

Він є найважливішою характеристикою якості звучання музики та мови у даному приміщенні і може змінюватися від 0,1 - 0,5 с у сильно заглушених приміщеннях до 5 - 6 с у гучних приміщеннях. Для кожного виду мови та музики різних жанрів в результаті численних експериментальних досліджень встановлено значення оптимального стандартного часу реверберації: для промови він може змінюватися в межах від 0,4 до 1 с, для камерної музики - від 1 до 1,5 с, для симфонічної - від 1,6 до 2,2 с і т. д. Для музики він повинен на 15-20% збільшуватися до низьких частот, а для мови навпаки, зменшуватися, що збільшує її розбірливість.

Експериментальні залежності оптимального часу реверберації від об'єму приміщення дозволили побудувати наступні наближені співвідношення:

- для промови $T_{\text{рев.}} = 0,3 \log V_{(\text{м}^3)} - 0,05$;
- для камерної музики $T_{\text{рев.}} = 0,4 \log V_{(\text{м}^3)} - 0,15$;

- для симфонічної музики $T_{\text{рев.}} = 0,5 \log V_{(\text{м}^3)} - 0,3$ [1].

Представлені вище формули визначення часу реверберації застосовні лише для дифузного звукового поля, тобто передбачається, що енергія розподіляється рівномірно по всьому об'єму приміщення. У реальних умовах, де працює джерело звуку (музикант, співак, оратор), на малих відстанях переважає енергія прямого звуку, яка зменшується пропорційно квадрату відстані; на великих відстанях переважає енергія відбитих звуків, тому поле вважатиметься дифузним. Для врахування взаємодії прямого та відбитих звуків у реальному приміщенні було введено поняття *акустичне відношення*, яке визначається як відношення щільності дифузної звукової енергії до щільності енергії прямого звуку:

$$R = E_{\text{відб.}} / E_{\text{пр.}}$$

Акустичне відношення залежить від відстані до джерела r , об'єму приміщення, часу реверберації і середнього поглинання в ньому:

$$R = 312 (r^2 T / V) (1 - \alpha_{\text{ср.}}).$$

Воно визначається для різних точок приміщення. Оптимальне його значення для мови складає приблизно 0,5 – 1, для музики – 6 – 8, для органної музики – 10 – 12. Якщо R більше цих меж, то мова і музика стають нерозбірливими; якщо $R < 2$, то музика здається занадто сухою, тому в кожному залі, залежно від його об'єму та часу реверберації в ньому, є оптимальні відстані для прослуховування мови і для прослуховування музики.

На певній відстані, де щільність енергії відбитих звуків дорівнює щільності енергії прямого звуку, акустичне відношення стає рівним одиниці: $R = 1$. Така відстань називається *радіусом гучності* r . Радіус гучності (іноді він позначається як *радіус реверберації*) пов'язаний з об'ємом приміщення і часом реверберації наступним наближеним співвідношенням (для не спрямованого джерела):

$$r = 0,06 \sqrt{\frac{V}{T}}.$$

При відстанях більше радіусу гучності в приміщенні переважає енергія дифузного звуку і для визначення часу реверберації можна застосовувати формули Себіна та Ейрінга. На відстанях менше радіусу гучності суб'єктивно відчутний час реверберації буде менший, ніж час стандартної реверберації, оскільки слухач знаходиться переважно в зоні прямого звуку. Тому на підставі суб'єктивних експертиз було введено поняття *час еквівалентної реверберації*:

$$\frac{1}{T_{\text{екв.}}} = \frac{1}{T} + \frac{1}{1,2} \lg \frac{1+R}{R} .$$

При великих R ($R > 3$) час еквівалентної реверберації буде дорівнювати часу стандартної реверберації ($T_{\text{екв.}} = T$). При малих R , тобто ближче до джерела, $T_{\text{екв.}}$ буде менше T , що краще відповідає слуховим відчуттям. Наприклад, при $T = 2$ с і $R = 1$ час ефективною реверберації буде 1,33 с.

Застосування статистичної теорії має обмеження як по діапазону відтворюваних частот, так і за об'ємом приміщення (для невеликих і не дуже маленьких приміщень), а також для приміщень з переважанням якогось одного лінійного розміру, з наявністю фокусуємих поверхонь і не рівномірним розподілом звукопоглинаючих матеріалів. Крім того, вона не застосовна до аналізу початкової ділянки ревербераційного процесу, де мають місце окремі дискретні відображення. Її сфера застосування - пізня ділянка процесу реверберації (рис. 1.2), де є щільні, майже суцільні відображення. Незважаючи на ці обмеження, вона є дуже корисним методом аналізу звукового поля у приміщеннях, що широко використовується в сучасній практиці акустичного проектування.

1.3. Геометрична (променева) теорія

Для якості звучання музики та мови в приміщеннях величезне значення мають перші дискретні відображення, які формують у слухача відчуття простору зали, проте в цей період часу (порядку 80 мс, в залежності від розміру зали) звукове поле ще не можна вважати рівномірним, тому методи статистичної теорії тут не застосовні. У цих випадках використовується інша

наближена теорія, яка отримала назву *геометричної* (або *променевої*). В основі геометричної теорії лежить аналогія із законами геометричної оптики, тобто можна розглядати рух звукових хвиль, як рух світлових променів. При цьому дотримуються всі закони геометричної оптики: для дзеркальних (відбиваючих) поверхонь кут падіння дорівнює куту відбиття, падаючий і відбитий промені лежать в одній площині, час приходу променя визначається пройденою відстанню і швидкістю поширення звуку. Виходячи з цього, можна розрахувати рівень звукового тиску в даній точці поля, якщо відома кількість променів, що прийшли до неї, в заданий відрізок часу, з урахуванням втрати енергії за рахунок поглинання на стінах при кожному відображенні і втрат при поширенні в повітрі. Загальний характер звукового поля в приміщенні може бути визначений шляхом побудови ескізів відбитих променів для різних точок приміщення. Цей метод використовується в сучасних комп'ютерних програмах для розрахунку структури звукового поля в приміщенні і дозволяє ще на етапі проектування передбачити виникнення таких грубих акустичних дефектів як, наприклад, фокусування звукових хвиль, явища сильного відлуння, тобто помітного на слух повторення прямого звуку. Помітність луни залежить від часу запізнення та інтенсивності відображених сигналів. При часі запізнення менше 80 мс відчуття луни практично відсутнє, навіть при досить великих рівнях сигналу. Наявність луни може призводити до порушення локалізації звукових джерел, що абсолютно неприпустимо в приміщеннях для прослуховування музики.

Характер відображення залежить від форми поверхні, що відбиває. При відображенні від плоскої поверхні (рис. 1.5, а) виникає уявне джерело I' , місце якого відчувається на слух подібно до того, як око бачить уявне джерело світла в дзеркалі. Відображення від увігнутої поверхні (рис. 1.5, б) призводить до фокусування променів у точці I' . Випуклі поверхні (колони, пілястри, великі ліпні прикраси, люстри) розсіюють звук (рис. 1.5, в) [9].

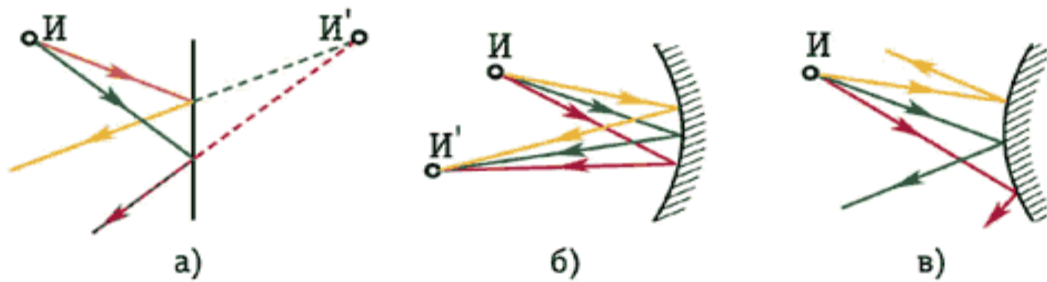


Рис. 1.5 [13].

Якщо накреслити шляхи відбитих променів для різних видів приміщень, то можна оцінити роль окремих ділянок приміщення у формуванні звукового поля в площині розміщення слухачів: від одних ділянок приходять звукові хвилі тільки після одного відображення, від інших після дворазового, триразового і т. д. Ділянки поверхні, відбиваючись від яких перший раз, звукова енергія приходиться на усю площу слухачьких місць, називаються *майданчиками перших відображень*. Частина поверхонь, де має місце дворазове відбиття, - *майданчиками других відображень* тощо і т. д. Користуючись методами геометричної теорії, можна побудувати їх розподіл для будь-якого приміщення. Наприклад, для приміщення прямокутної форми з довжиною, шириною і висотою L, B, H відповідно і розташуванням джерела звуку в одній зі стін на висоті h (рис. 1.6, а) майданчик перших відображень буде розташовуватися на стелі і мати розміри:

$$\text{довжина} - L' = [(H-h) / (2H-h)] L;$$

$$\text{ширина} - B' = [(H - h) / (2H - h)] B.$$

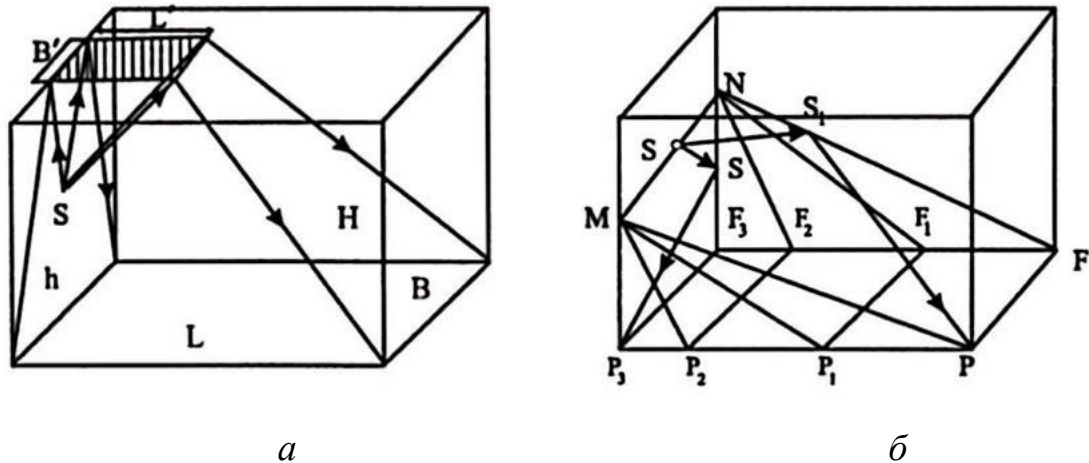


Рис. 1.6. Майданчики перших відображень в приміщенні:
a - на стелі; *б* - на боковій стіні [1].

Звідси видно, що чим нижче встановлено джерело звуку, тим більше майданчик перших відображень на стелі. Аналогічно можна побудувати майданчики других, третіх та ін. відображень. Якщо побудувати такі майданчики для всього приміщення, то можна виявити деякі загальні закономірності:

- майданчики перших відображень завжди є на стелі, отже, звукова енергія, що впала на стелю, зазвичай приходиться на площину слухацьких місць в початковому інтервалі ревербераційного процесу;
- на бічних стінах майданчики перших відображень зазвичай розташовуються нижче висоти розташування джерела звуку, тобто в нижній частині;
- на задній стіні і на підлозі також є майданчики перших відображень, але вони значно менші за площею і їх внесок у структуру перших відображень не дуже значний.

Отже, основний внесок у структуру перших відображень вносять форма та ступінь заглушення стелі й нижньої частини бічних стін [1].

Для визначення структури перших відображень важлива не тільки інформація про форму та розміри ділянок приміщення, звідки вони приходять у дану точку зали, але також інформація про час запізнення початкових відображень відносно моменту приходу прямого звуку і щодо одне одного.

Внаслідок інерційності слуху людина має здатність зберігати (інтегрувати) слухові відчуття, поєднувати їх у загальне враження, якщо вони тривають не більше 50 мс. Тому до корисного звуку, що підкріплює вихідний, відносяться всі хвилі, які досягають вуха протягом 50 мс після вихідного звуку. Звуки, що приходять пізніше, сприймаються як відлуння. Відображення від перешкод, що укладаються в зазначений проміжок часу, є корисними, бажаними, оскільки вони збільшують відчуття гучності на значення, що сягають 5 - 6 дБ і покращують якість звучання, надаючи звуку «живість», «пластичність», «об'ємність».

Для променя будь-якого порядку відображення час запізнення щодо прямого звуку визначається за формулою:

$$t_n = (l_n - l_0) / C,$$

де l_n , - шлях відбитого променя після n відображень;

l_0 - шлях прямого променя в дану точку [1].

Якість звучання залежить також і від того, з яких напрямків і в якій послідовності приходять звуки, що запізнюються. Якщо всі ранні відображення, надходять до слухача з того ж напрямку, що й прямий сигнал, слух майже не розрізняє різниці в якості звучання в порівнянні із звучанням лише прямого звуку. Виникає враження «плоского» звуку, позбавленого об'ємності. Втім, навіть прихід лише трьох сигналів, що запізнюються по різних напрямках, незважаючи на відсутність ревербераційного процесу, створює ефект просторового звучання. Перший сигнал, що запізнюється, має приходити від стелі, другий - від бічних стін, третій - від задньої стіни зали. Але якщо перше відображення надходить з фронтального напрямку, звучання погіршується. Якщо з тильного, то різко погіршується.

Тривалість запізнення повинна бути різною для найкращого звучання мови та музики. Хороша розбірливість мови досягається, якщо перший сигнал, що запізнюється, надходить не пізніше 10 - 15 мс після прямого, а всі три повинні займати інтервал часу 25 - 35 мс.

Для музики найкраще відчуття просторовості та «прозорості» досягається, якщо перше відображення приходить до слухача не раніше 20 мс і не пізніше 30 мс після прямого сигналу. Всі три сигнали, що запізнюються, повинні знаходитись в проміжку часу 45 - 70 мс. Найкращий просторовий ефект досягається, якщо рівні початкових сигналів, що запізнюються, незначно відрізняються один від одного і від рівня прямого сигналу [1].

При підключенні до структури початкових відображень решти відзвуку найбільш сприятливе звучання виходить у тому випадку, коли друга частина процесу починається після всіх дискретних відображень. Якщо ж процес реверберації починається відразу ж за прямим сигналом – це погіршує якість звучання.

По культовим і видовищним спорудам, що збереглися до наших часів видно, що основні положення променевої теорії були відомі стародавнім будівельникам і неухильно ними дотримувалися. Розміри грецьких і римських театрів на відкритому повітрі були обрані такими, щоб максимально використовувати енергію відбитих хвиль. Театри містили три основні частини (рис. 1.7):

- сцену (shena) глибиною 3,5 - 4 м у Греції та 6 - 8 м у Римі, на якій



Рис. 1.7. План стародавнього театру [9].

розігрувалась театральна дія;

- майданчик перед сценою - орхестру (orhestra буквально «місце танців»), де розташовувався хор і виступали танцюристи;
- глядацькі місця навколо орхестри, що піднімаються сходами і утворюють так званий амфітеатр (від грецьких слів *amphi* - «з обох боків», «навколо» і *theatron* - «місце видовищ»).

Звуки від виконавців досягали глядачів, що розташовувалися на амфітеатрі, прямим шляхом 1, а також після відбиття від поверхні орхестри (промінь 2) і стіни, що знаходиться за сценою (рис. 1.8).

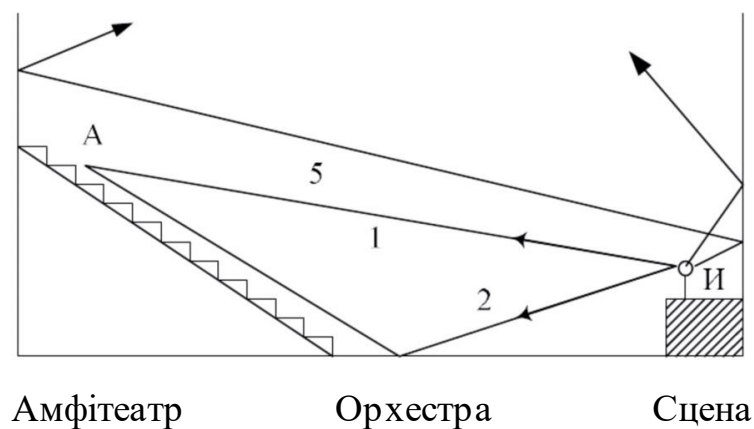


Рис. 1.8 [9].

Площину орхестри покривали добре відбиваючим матеріалом. Як вказував Вітрувій, «для покращення акустики» висоту стіни за сценою слід було вибирати рівною висоті парапету, що захищав верхній ряд амфітеатру. Мабуть, йшлося про те, щоб не допустити зайвого розсіювання звукової енергії у просторі. Глибину сцени в грецьких театрах робили невеликою, щоб промені 5, відбиті від задньої стіни, не надто запізнювалися по відношенню до прямого променя 1 і не погіршували розбірливість мови акторів. Частина звукової енергії, відбившись від стін, йшла вгору. У сучасних крих театральних залах ця енергія відбивається стелею вниз і збільшує інтенсивність звуку на місцях глядачів. На орхестрі відбувалися танці і

розташовувався хор, який повторював репліки акторів, тобто виконував завдання звукопідсилення.

При розташуванні хору в точці 1 звукові промені, відбившись від стіни позаду сцени (рис. 1.9), приходять до глядача з великою затримкою в часі, що викликає відлуння. Для зменшення цього недоліку в римських театрах хор стали розташовувати ближче до сцени, в точці 2. Тоді для спрямування енергії у бік глядачів почали використовувати відображення від сцени (її висота в римських театрах досягала 3,5 м), а частину оркестри, що звільнилася, зайняли танцюристи.

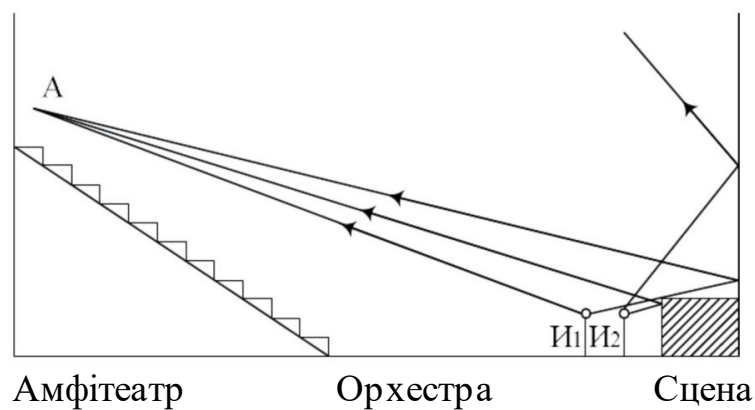


Рис. 1.9 [9].

У сучасних театрах перед сценою знаходяться музиканти, тому на них перейшла назва займаного ними майданчика – *оркестр* [9].

Раціональною формою і розумно обраними розмірами вирізнялися театральні та концертні зали 18 і 19 століть. Низку хороших в акустичному відношенні театральних і концертних залів було побудовано в різних країнах і в 20 столітті. Досвід, накопичений за тисячоліття, мав би використовуватися сучасними архітекторами та будівельниками, натомість існує багато прикладів незадовільних акустичних рішень, наприклад, будівництво залів круглої чи еліптичної у плані форми. В них утворюються зони фокусування відбитих

променів і зони, у які відбиті промені або не потрапляють зовсім, або потрапляють із великою затримкою в часі.

У залі круглої форми дотичний до стіни промінь 1 і при наступних відображеннях залишається в близькій до стіни зоні (рис. 1.10).

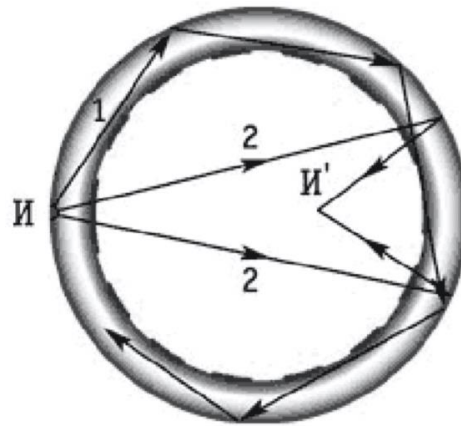


Рис. 1.10 [9].

Промені 2, що розповсюджуються приблизно в діаметральному напрямку, утворюють після відображення уявне зображення джерела $И'$, в якому інтенсивність звуку, як і в кільцевій зоні біля стіни, підвищена [9].

Незадовільними є зали з плоскою стелею та низьким порталом сцени (рис. 1.11, а). Зона ABC виявляється своєрідною пасткою для значної частини енергії, що випромінюється джерелом звуку. Тільки зона DE дає корисні відображення, але вони потрапляють лише у віддалену частину зали GF . В такому випадку кращими будуть конструкції із стелею, що розсіює звук (рис. 1.11, б), акустичною раковиною і козирком (рис. 1.11, в) [9].

Застосування методів геометричної акустики дозволило виробити загальні рекомендації щодо вибору форми та розмірів приміщення. В основу вибору конфігурації приміщення повинні бути покладені такі вимоги:

- сила звуку і, відповідно, рівень гучності повинні бути однаковими на всій площі, зайнятою слухачами аудиторії або глядачами театру. Звукове поле в

приміщенні має бути настільки дифузним, щоб забезпечити найбільшу чіткість і розбірливість звуку, головним чином мови;

- повинні бути усунені ефекти сильного відлуння, тобто пізні відображення великої інтенсивності на усіх слухацьких місцях зали.

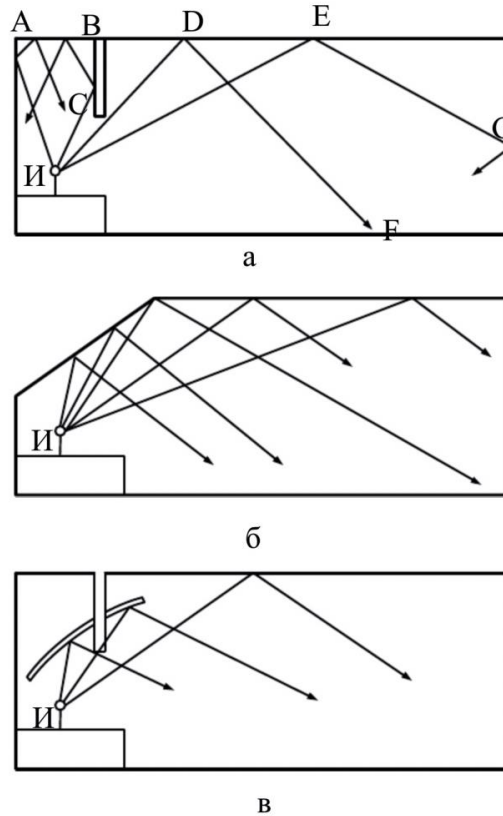


Рис. 1.11. Вертикальний розріз зали з низькою стелею [9].

Зазначені вимоги можуть бути виконані при дотриманні наступних умов:

- відстань між джерелом звуку та слухачем має бути мінімальною (рис. 1.12, тип 1);
- форма плану має враховувати спрямованість джерела звуку, що особливо важливо при проектуванні аудиторій. Кут між променями, спрямованими від джерела до крайніх передніх місць партеру, має бути якнайменшим. У всякому разі, він не повинен перевищувати 90° (рис. 1.12, тип 2);
- відбиваючі поверхні поблизу джерела повинні посилати максимум звукової енергії в зал (рис. 1.12, тип 3);

- у приміщенні, яке має відрізнятися хорошими акустичними характеристиками, слід уникати увігнутих і склепінчастих поверхонь, оскільки наявність таких форм пов'язана з небезпекою виникнення фокусів - місць концентрації звукової енергії (рис. 1.12, тип 4);

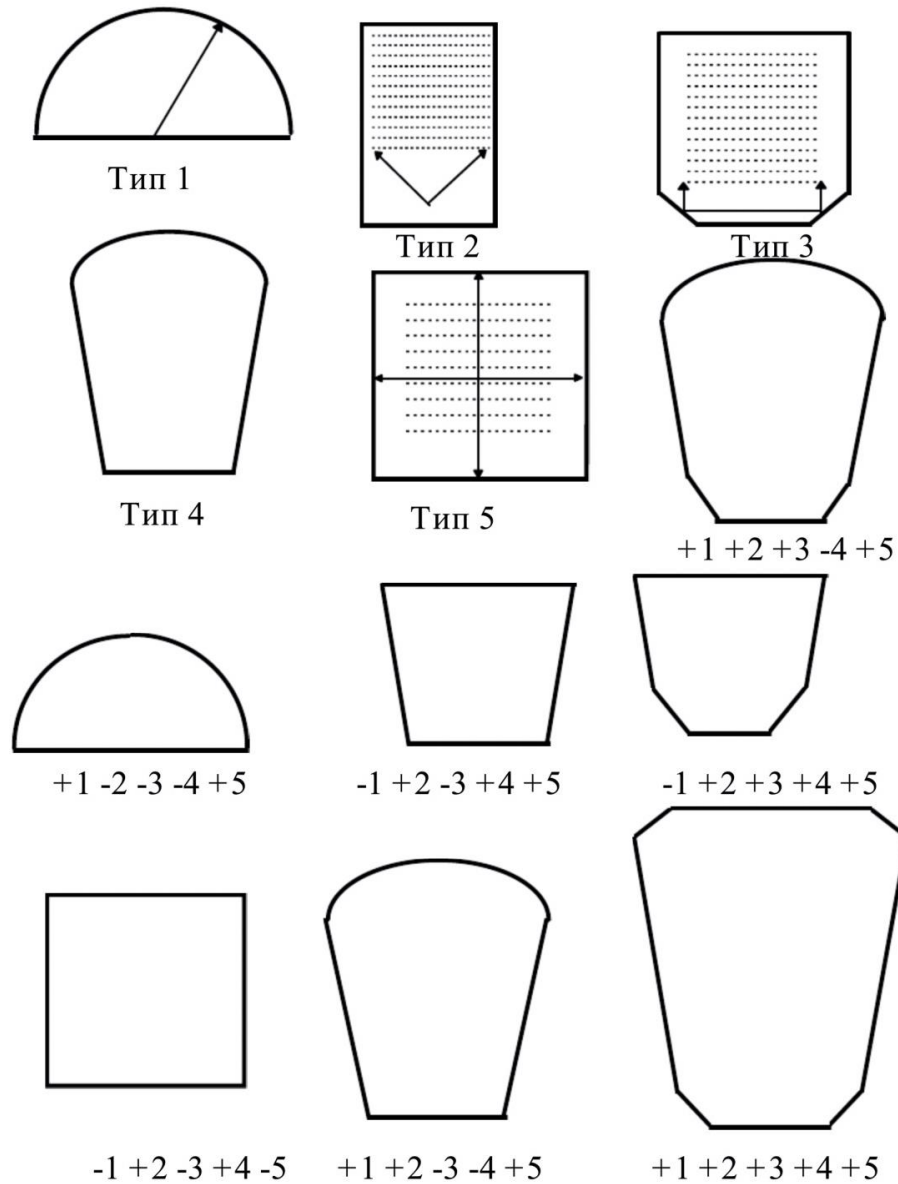


Рис. 1.12. Форми приміщень [9].

- при паралельних стінах квадратної зали спостерігається виродження спектру власних частот і, так звана, «луна, що пурхає», тобто багаторазова періодична послідовність луни, що створює тональне забарвлення звуку («ефект гребінчастого фільтру»), яка росте зі збільшенням розмірів приміщення (рис. 1.12, тип 5);

Знаки плюс і мінус, а також цифри під іншими планами показують, які з перерахованих вище вимог виконані або не виконані [9].

При виборі оптимальних розмірів зали потрібно приділяти велику увагу вибору висоти приміщення та форми стелі. Погана акустика, притаманна багатьом великим залам, часто пояснюється надто високими стелями або їхньою невдалою формою. З акустичної точки зору основне призначення стелі - забезпечити відбитим звуком останні ряди, на яких рівень сили прямого звуку менше, ніж передніх і середніх. Причина сильного згасання полягає в поглинанні звуку вздовж площі підлоги, зайнятої слухачами. Втрата рівня, викликана поглинанням, може бути зкомпенсована відбитим від стелі звуком, однак при цьому треба враховувати, що відбита хвиля досягає місця прийому із запізненням [9].

Область застосування геометричної теорії обмежується умовою $\lambda \ll D$, де λ - довжина хвилі, D - лінійні розміри приміщення, тобто порівняно високочастотним діапазоном. Одна з причин цього полягає в тому, що геометрична теорія не враховує процесів дифракції, які виникають, коли довжина хвилі стає співмірною з розмірами окремих перешкод у приміщенні. Проте в даний час з'явилися методи, що дозволяють ввести облік дифракційних поправок і тим самим розширити сферу застосування геометричної теорії [1].

1.4. Хвильова теорія

Хвильова теорія розглядає приміщення як резонатор, аналогічно, наприклад, трубі музичного інструменту. Повітряний об'єм приміщення має

певну масу і пружність, отже, можна розрахувати його власні частоти та власні форми коливань. Якби приміщення складалося з двох жорстких стін і між ними було поміщене джерело звуку, то в ньому на певних (резонансних) частотах в результаті інтерференції падаючої і відбитої від жорсткої стіни хвилі виникали би стоячі хвилі. При цьому біля твердих стін звуковий тиск завжди залишався би максимальним (швидкість частинок повітря дорівнювала б нулю). У певних точках приміщення утворювалися б максимуми і мінімуми звукового тиску, що досить часто має місце в реальних приміщеннях вздовж довгих стін. Якщо приміщення має прямокутну форму, то розрахунок його власних частот може бути виконаний за наступною формулою, отриманою Релеєм у 1896 році:

$$f_{k,m,n} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{k}{L}\right)^2 + \left(\frac{m}{B}\right)^2 + \left(\frac{n}{H}\right)^2},$$

де k, m, n – цілі числа, що відповідають номеру резонансної частоти;
 L, B, H – довжина, ширина і висота приміщення [1].

Звукове поле в тривимірному приміщенні утворюється з стоячих хвиль трьох видів:

— *аксіальних (осьових) хвиль*, для яких два з трьох чисел (k, m, n) дорівнюють нулю. Наприклад, якщо $m, n = 0$, а $k \neq 0$, то це аксіальні хвилі вздовж довжини приміщення; якщо $m \neq 0$, то вздовж ширини приміщення; якщо $n \neq 0$ - вздовж висоти;

— *тангенціальних хвиль*, для яких одне з трьох чисел (k, m, n) дорівнює нулю. Наприклад, якщо $k = 0$, а $m, n \neq 0$, то це тангенціальні хвилі, паралельні площині B, H і т. д.;

— *косих хвиль*, для котрих усі три числа не дорівнюють нулю ($k, m, n \neq 0$), тобто це стоячі хвилі між усіма шістьма поверхнями в приміщенні.

Вся звукова енергія, що випромінюється джерелом звуку в замкнутий простір, витрачається на збудження осьових (50%), тангенціальних (25%) та косих (12%) хвиль. Якщо прийняти рівень аксіальних хвиль за 0 дБ, то тангенціальні матимуть рівень -3 дБ, косі - -6 дБ [1].

Нижчі власні частоти відносяться до осьових хвиль, потім виникають тангенціальні хвилі і тільки після - косі. Саме тому при проектуванні студій звукозапису, де це особливо важливо, найбільша увага приділяється демпферуванню осьових хвиль, оскільки саме вони створюють найбільшу нерівномірність розподілу звукового тиску вздовж довжини приміщення [1].

При збудженні повітряного об'єму в приміщенні на його власних частотах відбувається підсилення відповідних частот у спектрі джерела за рахунок резонансів (смугова фільтрація) і, відповідно, спотворюється тембр, з'являється «забарвлення» звуку, тому найважливішою характеристикою акустичних властивостей приміщення є *щільність спектру* його власних частот. Для його оцінки, тобто кількості власних частот всередині смуги частот Δf , використовується формула:

$$\Delta N = [(4\pi V)(f/C)^3 + (\pi S/2)(f/C)^2 + (E/8)(f/C)] \Delta f / f,$$

де $E = 4(L + B + H)$ – сума довжини, ширини і висоти приміщення;
 f – центральна частота смуги Δf [1].

З цієї формули випливає, що щільність спектру зростає зі збільшенням об'єму приміщення і зі збільшенням частоти, тому АЧХ спектру стає більш однорідною і приміщення робить значно менший внесок у зміну спектру, а отже і тембру джерела. Найбільш небезпечною є низькочастотна область, де основну роль грають осьові моди коливань. Середня відстань між ними приблизно 20 Гц та середня ширина кожної резонансної смуги близько 5 Гц. Для великих приміщень ця частина дискретного спектру розташовується в області частот 18 - 60 Гц, тобто нижче звичайного діапазону музичних інструментів та голосу. Для малих приміщень область дискретного спектру потрапляє в діапазон мови та музики і вносить значне забарвлення звуку. Таким чином, мале приміщення має АЧХ з великою нерівномірністю. Це одна з причин, через які запис і прослуховування музики в таких приміщеннях не дають хороших результатів.

При вимиканні джерела звуку, тобто примушуючої сили, об'єм повітря в приміщенні, як будь-яка розподілена механічна система, переходить у режим

вільних затухаючих коливань. В області низьких частот, де приміщення має дискретний спектр, процес згасання відбувається на власних частотах приміщення, які не збігаються зі спектральними складовими джерела звуку, що сприймається слухом як спотворення його тембру. Причому, оскільки власні частоти приміщення розташовані достатньо близько одна до одної, в процесі згасання можуть виникати биття. Швидкість згасання різних мод коливань в приміщенні буде різною: швидше усього згасають косі хвилі, потім тангенціальні та осьові. Тому розподіл енергії в процесі реверберації буде змінюватися: все більшу роль починають відігравати осьові хвилі. Всі ці причини призводять до того, що наявність виражених дискретних власних частот і мод коливань, особливо в малих приміщеннях, є вкрай небажаним фактором, що погіршує загальну «акустику» приміщення, тобто якість звучання в ньому музики та мови. Для боротьби з ними проектувальниками приміщень використовуються різні методи: вибір пропорцій і форми приміщення, розміщення різних нерегулярностей у ньому (колон, відбивачів), вибір звукопоглинаючих матеріалів і способів розміщення їх на стінах.

Вкрай небажана кубічна форма: при ній відбувається співпадіння власних частот, за рахунок чого деякі з них стають найбільш вираженими по амплітуді, а це, у свою чергу, призводить до сильного забарвлення звуку. Вибором відповідних пропорцій можна домогтися більш рівномірного розподілу частот у спектрі. Ще в Стародавній Греції були відкриті пропорції «золотого перерізу», при яких співвідношення висоти, ширини і довжини приміщення підпорядковується наступному закону:

$$L/B = B/H \text{ при } L = B + H,$$

де L – довжина, B – ширина, H – висота приміщення.

Якщо врахувати, що об'єм приміщення $V = L \times B \times H$, то вийде:

$$H = 0,62\sqrt[3]{V}; B = \sqrt[3]{V}; L = 1,62\sqrt[3]{V}.$$

Саме ці пропорції широко використовувалися архітекторами минулих століть при створенні концертних залів з чудовою акустикою. У сучасних роботах

наводяться також такі рекомендації для вибору допустимих пропорцій приміщення $H : B : L$:

$$1 : 1,14 : 1,39; 1 : 1,28 : 1,54; 1 : 1,6 : 2,33; 1 : 1,62 : 2,62 [1].$$

Для забезпечення більш рівномірного розподілу власних частот використовується непрямокутна форма приміщення, в якому розрахунок спектру і структури звукового поля проводиться на основі хвильової теорії чисельними методами за допомогою різних комп'ютерних програм. Таким чином, хвильова теорія є найбільш точним, але й найбільш трудомістким методом розрахунку структури звукового поля у приміщеннях, навіть незважаючи на широке використання комп'ютерних технологій.

1.4.1. Коефіцієнт поглинання з позицій хвильової теорії

Хвильова теорія дала відповідь на питання, що має практичне значення при спорудженні різних залів та аудиторій: чому звукопоглинаючі матеріали, коефіцієнти поглинання яких визначені в звукомірній камері, поведуться в приміщенні іншим чином, начебто їх коефіцієнти поглинання відрізняються від вимірених та зазначених у довідниках. Справа в тому, що у звукомірній камері матеріал, як правило, досліджують у дифузному полі. Коефіцієнт поглинання визначається усередненням по всіх кутах падіння звукових хвиль. Але коефіцієнт поглинання багатьох матеріалів залежить від кута падіння хвилі, а отже від її типу – осьового, тангенціального, косоного. Для більшості пористих матеріалів коефіцієнт поглинання зростає зі збільшенням кута падіння за законом:

$$\alpha_{\theta} = \alpha_0 / \cos \theta ,$$

де α_0 – коефіцієнт поглинання при нормальному (перпендикулярному) падінні;

θ – кут між нормаллю та напрямом падаючої на перешкоду хвилі.

Але при наближенні θ до 90° α різко зменшується в результаті ковзання хвилі вздовж перешкоди (рис. 1.13).

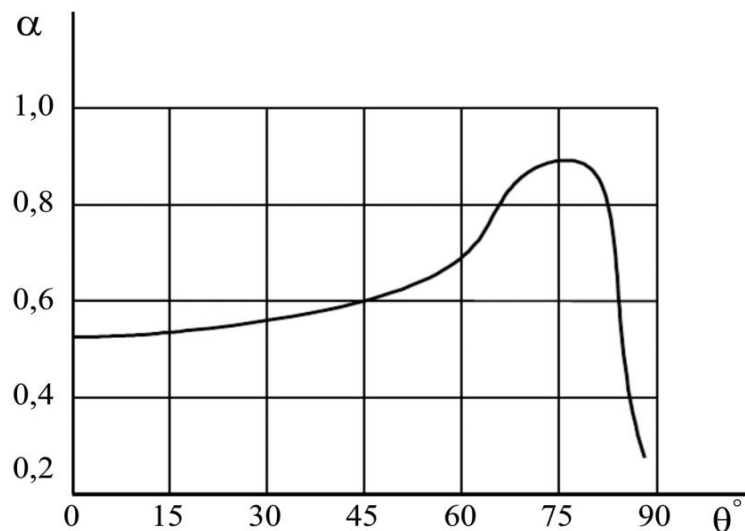


Рис. 1.13. Залежність коефіцієнта поглинання пористого матеріалу від

кута падіння звукової хвилі [9].

Тому в приміщенні матеріал поводиться інакше, ніж у звукомірній камері. Крім того, через нестаціонарність звукового поля α залежить не тільки від властивостей матеріалу перешкоди, а й від загального поглинання приміщення $A = \alpha_{сер}S$. Тому коефіцієнт поглинання того самого матеріалу в різних приміщеннях може відрізнятись в 1,5-2 рази [9].

Висновки до розділу

Три розглянуті теорії з різних боків пояснюють акустичні процеси у приміщеннях, але на даний момент жодна з них не дозволяє з єдиних позицій вирішувати конкретні завдання оптимізації у приміщеннях різної форми і розмірів, тому у практиці проектування приміщень використовуються всі три теорії: хвильова, статистична та геометрична. Межі їх застосовності наближені і залежать від об'єму приміщення. З них лише одна – статистична – дозволяє чисельно визначити важливу величину, що характеризує акустичні властивості приміщення – час реверберації. Слід лише свідомо, критично ставитися до одержуваної числової оцінки, розуміти, що у більшості випадків, особливо під час розгляду великих приміщень, вона має орієнтовний характер. В той же час, за вимірним часом реверберації ця теорія дозволяє визначити середній і загальний коефіцієнт поглинання, а це може бути використано під час акустичної корекції вже існуючих приміщень.

Геометрична теорія більш прикладна до аналізу акустичних процесів у приміщеннях великих розмірів - концертних та театральних залах, великих студіях. Оптимальні розміри зали визначають з урахуванням аналізу початкових відображень. При проектуванні великих приміщень розрахунок часу реверберації може дати результат, що відрізняється від реального, а головне, що ця величина не дозволяє повністю оцінити акустичну якість приміщення. У такій оцінці головну роль відіграють початкові відображення,

їх правильне співвідношення в часі забезпечує високу якість звучання навіть тоді, коли час реверберації відрізняється від оптимального на 10-15%.

Хвильова теорія застосовується до приміщень порівняно малих розмірів, наприклад до студій звукозапису та аудиторій різного призначення. Вона дає можливість розрахувати спектр власних (резонансних) частот, скоригувати розміри і форму приміщення так, щоб спектр власних частот в області нижніх частот був найбільш рівномірним.

Таким чином, із збільшенням розмірів приміщення збільшується область застосування статистичної і геометричної теорій. Для малих приміщень їх область застосування дуже обмежена і там переважно можливе застосування хвильової теорії.

РОЗДІЛ 2

ЗВУКОПОГЛИНАЮЧІ МАТЕРІАЛИ ТА КОНСТРУКЦІЇ

Звичайні будівельні матеріали, за допомогою яких обробляються внутрішні поверхні приміщень, мають малий коефіцієнт поглинання. Тому для створення оптимальних акустичних умов у приміщеннях доводиться застосовувати спеціально розроблені матеріали та конструкції, абсорбенти, що мають підвищену здатність поглинати звукову енергію. Залежно від принципу дії їх можна розділити на дві групи: *пористі* та *резонансні*.

2.1. Пористі матеріали

До першої групи відносяться всі типи пористих матеріалів: пористі облицювальні плити, мати з різної вати, наприклад, скляної, мінеральної, капронової тощо, акустична штукатурка, різні драпірування, килими та ін.

Поглинання звукової енергії пористими матеріалами обумовлено в основному тертям при русі частинок повітря в порах і внутрішнім тертям при деформації скелету матеріалу. При відображенні звукових хвиль від жорсткої перешкоди на її поверхні утворюється пучність тиску (складаються тиски падаючої і відбитої хвиль) і вузол коливальної швидкості, оскільки частинки повітря тут, натрапивши на перешкоду, змінюють напрямок свого руху на зворотний. Фази коливальної швидкості падаючої та відбитої хвиль будуть зсунуті на 180° . Пучність коливальної швидкості буде знаходитись на відстані, що дорівнює $\lambda/4$ від жорсткої перешкоди.

Оскільки втрати на тертя пропорційні коливальній швидкості, то й максимум поглинання пористого матеріалу невеликої товщини спостерігатиметься при його розташуванні на відстані $\lambda/4$ від жорсткої перешкоди.

Отже, для ефективного поглинання енергії високих частот досить невеликого відступу поглинача від жорсткої перешкоди або невеликої його

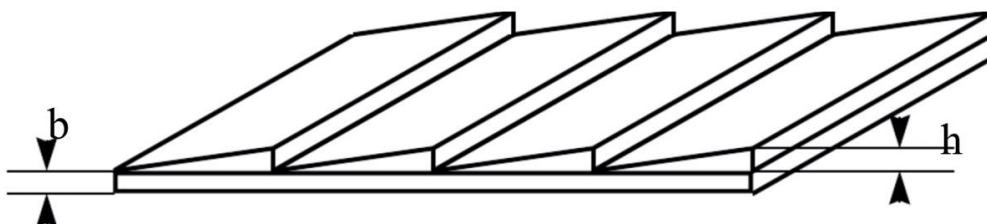
товщини. На низьких частотах знадобиться або значна товщина поглинача, або віднесення його на велику відстань від перешкоди. Тому пористі матеріали застосовуються в якості високочастотних абсорбентів.

2.2. Резонансні поглиначі

Звукопоглинаючі конструкції резонансного типу виконуються або у вигляді резонаторів з пластиною, що коливається (резонуючі панелі), або у вигляді повітряних резонаторів і застосовуються для поглинання звукової енергії в області низьких і середніх частот.

Резонуючі панелі конструктивно являють собою пластину з фанери або пластику, натягнуту клейонку тощо, закріплену на рамі з дерев'яних брусків з таким розрахунком, щоб між пластиною і несучою поверхнею залишався б повітряний проміжок. Якщо частота коливань падаючої звукової хвилі збігається з власною резонансною частотою пластини, то амплітуда коливань останньої буде максимальною. Максимальні будуть і втрати енергії, зумовлені внутрішнім тертям у матеріалі пластини при її згинанні.

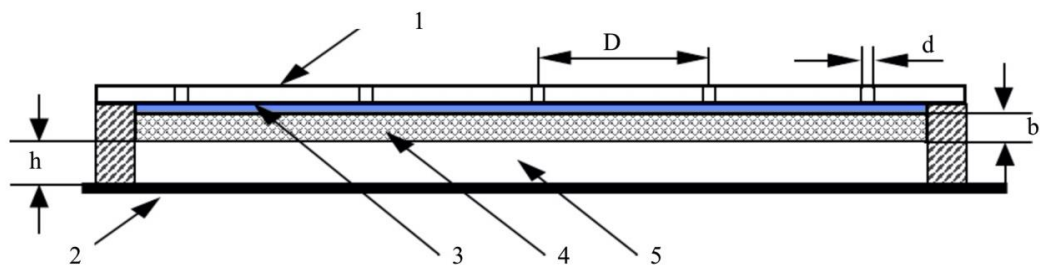
Зазвичай коефіцієнт поглинання таких конструкцій виявляється невеликим. Для збільшення поглинання повітряний проміжок між пластиною і несучою поверхнею заповнюють пористим поглинаючим матеріалом. Резонуючі панелі використовуються в приміщеннях або як декоративне оформлення нижньої частини стін, або у вигляді спеціальних конструкцій, відомих під назвою щитів «Бекеші». Часто резонуючі панелі виконують у вигляді пілкоподібних конструкцій (рис. 2.1).



b – товщина брусів каркаса, h – висота «зубу пили».

Рис. 2.1. Ескіз пилкоподібних резонуючих панелей [9].

Конструкції з перфорованим покривним листом за типом схожі на резонуючі панелі. Тут також на рамі закріплюється покривний лист, утворюючи повітряний проміжок з несучою поверхнею. Однак у покривному листі робляться отвори. Кожен такий отвір, з об'ємом повітря за ним, є резонатором Гельмгольца, резонансна частота якого може легко зміщуватися в область низьких і середніх частот шляхом зміни товщини листа, діаметру отворів d , відстані між ними D , а також повітряного проміжку між листом та несучою поверхнею $h + b$ (рис. 2.2).



1 – перфорований лист, 2 – несуча поверхня, 3 – акустично прозора тканина, 4 – пористий заповнювач, 5 – повітряний проміжок.

Рис. 2.2. Ескіз конструкції з перфорованим покривним листом [9].

При співпадінні частоти коливань падаючої звукової хвилі з власною частотою резонатора маса повітря в отворі набуває максимальної коливальної швидкості. За рахунок тертя частинок повітря об стінки отвору створюються втрати звукової енергії тим більше, чим менше діаметр отворів. Поглинання звукової енергії в таких конструкціях може бути збільшене підкладанням акустично прозорої тканини під отвори з тильного боку листа, або додатково заповненням повітряного проміжку пористим поглинаючим матеріалом [9].

У приміщеннях, у яких для забезпечення оптимальних акустичних умов недостатньо акустичної обробки стін та стелі, застосовують звукопоглиначі,

які являють собою плоскі, або об'ємні звукопоглинаючі елементи, вільно підвішені в приміщенні. За рахунок явища дифракції вони мають більший коефіцієнт звукопоглинання, ніж площинні облицювання. Звукопоглинаючі властивості об'ємних поглиначів залежать від відстані між ними, яка має бути не меншою, ніж в 1,5, але не більшою, ніж в 2 рази від величини найбільшого поперечного розміру конструкції. Великою їхньою перевагою є легка заміненість і простота монтажу.

Висновки до розділу

Оскільки частотні характеристики коефіцієнтів поглинання матеріалів і конструкцій різні, для отримання необхідного фонду поглинання на всіх частотах доводиться застосовувати різне їх поєднання. При акустичній обробці приміщень, для створення в них більш дифузного звукового поля, звукопоглинаючі матеріали та конструкції слід розміщувати рівномірно, чергуючи між собою абсорбенти з різним поглинанням.

Частотний діапазон звуків, які чує людина, простягається від 20 до 20 000 Гц. Акустичні розрахунки натомість проводяться для інтервалу, обмеженого частотами 100 - 4000 Гц, оскільки на частотах більше 4 кГц у приміщеннях великого об'єму важко розділити складові поглинання, зумовлені матеріалами та повітрям. Тому достовірні дані про коефіцієнти поглинання матеріалів на більш високих частотах відсутні. Так само важко отримати достовірні дані про коефіцієнти поглинання на частотах нижче 100 Гц. Лінійні розміри зразків матеріалів повинні бути принаймні порівняні з довжиною хвилі. Для частоти 100 Гц це 3,4 м. Очевидно, що зразки настільки значних розмірів не можна розмістити в звукомірних камерах, тому про їх властивості на низьких частотах можна судити лише приблизно. На даний момент існує брак дешевих матеріалів, які ефективно поглинають звукову енергію в області 100 Гц і нижче.

РОЗДІЛ 3

ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ І ВИДИ СИСТЕМ ЗВУКОПІДСИЛЕННЯ В ПРИМІЩЕННЯХ

Протягом століть у концертних залах, театрах, лекційних залах, церквах звучали лише природні джерела - голос оратора і співака, гра музикантів тощо. Визначальну роль для передачі звуку при цьому мала «природна» акустика приміщення, яка залежить від його форми, розмірів, розміщення матеріалів, що поглинають звук, та інших факторів.

У ХХ столітті нові технічні можливості, у зв'язку з винаходом і розвитком звукопідсилювальної апаратури, та прагнення вмістити якнайбільше слухачів призвели до будівництва кіноконцертних залів дуже великих розмірів. При цьому змінилася їхня конфігурація - вони набули більш витягнутих форм з низькими стелями. Змінилися смаки та стилі музики: слухачі, особливо молодь, звикли слухати музику на дуже високих рівнях гучності. Розширилося будівництво спортивних споруд на сотні тисяч глядачів, де виявилася необхідною трансляція концертів за високих рівнів шумів. З'явилася необхідність проведення конгресів, конференцій тощо з перекладом на різні мови. Все це викликало суттєві зміни у вимогах до акустичних параметрів сучасних великих залів багатоцільового призначення і призвело до широкого використання в них систем озвучування та звукопідсилення [1].

Системою озвучування називається комплекс електроакустичних пристроїв, що складається з випромінювачів, мікрофонів, підсилювачів, різних коректорів тощо, встановлених спеціальним чином і призначених для відтворення звукових сигналів з достатнім рівнем гучності для всіх слухачів, що знаходяться в даному приміщенні, або відкритому майданчику. Необхідність у системах озвучування виникає тоді, коли потужність природних джерел виявляється недостатньою для забезпечення хорошої

чутності у всій зоні розташування слухачів. Чутність може бути поганою через високий рівень шумів, значних відстаней до слухачів, несприятливих акустичних умов у залі і т. д.

Переважає більшість систем озвучування може бути розділена на три великі групи.

1. *Зосереджені системи*, у яких звук до слухача надходить майже з однієї точки. Це можуть бути близько розташовані випромінювачі над сценою. Наприклад, одна або дві акустичні системи в аудиторії, або кілька випромінювачів у центрі зали у вигляді люстри. Перевагою зосереджених систем є можливість забезпечити суміщення «зорового і слухового образу», недоліком - складність забезпечення рівномірності звукового поля на озвучуваній поверхні.
2. *Зональні системи*, що складаються з ряду зосереджених випромінювачів, кожен з яких працює на свою зону. Такі системи можуть бути лінійними, наприклад для озвучування вузьких і довгих площ та вулиць, і просторовими, в яких вся площа розбита на зони. Перевагою таких систем є можливість озвучування великих площ, недоліком - велика нерівномірність звукового поля, особливо в зонах перекриття і небезпека виникнення луни.
3. *Розподілені системи*, в яких гучномовці розподілені таким чином, щоб рівень поля в кожній точці визначався сумарною дією всіх або більшості випромінювачів. Розподілені системи діляться на лінійні (наприклад, розташовані на бічній стіні) і поверхневі (на стелі, на стінах) [1].

З систем озвучування, що використовуються в даний час, можна виділити кілька основних типів:

- системи озвучування для відкритих і закритих приміщень, де звук сприймається тільки через звуковідтворювальний тракт, тобто записаний раніше на якийсь носій і відтворюється тільки в даному приміщенні, наприклад, у кінозалах, дискотеках та ін. У таких приміщеннях знаходиться

лише апаратура для відтворення, наприклад, програвач компакт-дисків, рупорні гучномовці;

- системи озвучування для залів, де слухач сприймає «природний» звук зі сцени та звук через систему озвучування. У цьому випадку в одному приміщенні знаходяться джерела звуку, наприклад, співак, оратор, музикант, а також мікрофон, система підсилення і корекції звуку та система відтворення. Така система озвучування називається зазвичай *системою звукопідсилення*. Особливість систем звукопідсилення полягає в тому, що в них мікрофон знаходиться в звуковому полі випромінювачів, а це може призвести до появи зворотного зв'язку, нестійкості роботи системи;

- системи озвучування або звукопідсилення, які додатково виконують функції створення просторового звукового образу або формування ревербераційного процесу, наприклад, амбіофонічні системи тощо. Існують і інші різновиди, наприклад, системи озвучування для конференц-систем з перекладом мов і т. д.

До основних параметрів, що визначають якість систем звукопідсилення, відносяться *діапазон частот*, що ефективно відтворюється, *нерівномірність*, *чутливість*, *діаграма спрямованості*, *коефіцієнт нелінійних спотворень* тощо. Саме вони значною мірою визначають загальні характеристики тракту звукопідсилення.

Не менш важливими характеристиками системи звукопідсилення є також:

- *динамічний діапазон*, тобто різниця між максимально можливим для даного тракту рівнем сигналу в точці віддаленого слухача і рівнем шумів і перешкод у приміщенні. Якщо динамічний діапазон джерела звуку (оркестра, співака, оратора) становить D дБ (він дорівнює різниці між максимальним і мінімальним рівнями сигналу, створюваного даним джерелом), то максимальний рівень сигналу, створюваного системою звукопідсилення в будь-якій точці поверхні, що озвучується, повинен дорівнювати:

$$N_{max}^{тракту} = N_{шум} + N_{перев.} + D,$$

де $N_{\text{шум}}$ – рівень шумів;

$N_{\text{перев.}}$ – рівень перевищення (зазвичай 10-12 дБ).

Значення $N_{\text{max}}^{\text{тракту}}$ залежить від виду сигналу, що передається. Наприклад, максимальний рівень $N_{\text{max}}^{\text{тракту}}$ для поп-музики сягає 120 дБ; для симфонічного оркестру $N_{\text{max}}^{\text{тракту}} = 100$ дБ; для мови $N_{\text{max}}^{\text{тракту}} = 80-86$ дБ [1].

Сумарний рівень перешкод складається з усіх видів акустичних шумів у точках, де знаходяться слухачі. Акустичні шуми можуть бути як зовнішні, що проникають від транспорту, так і внутрішні, наприклад, від шумів апаратури, слухачів тощо.

Може виявитися, що динамічний діапазон джерела звуку занадто великий і тракт звукопідсилення не може забезпечити необхідного значення $N_{\text{max}}^{\text{тракту}}$, наприклад, через виникнення зворотного зв'язку або перевантаження вхідного тракту. У таких випадках застосовується компресія, тобто стиснення динамічного діапазону за рахунок застосування програмних або апаратних засобів динамічної обробки сигналу, збільшенням відстані між мікрофоном і джерелом звуку. Такий метод часто використовують співаки, віддаляючи мікрофон під час виконання гучних місць в вокальних партіях і навпаки, наближують його впритул в тихих місцях.

- *нерівномірність звукового поля*, що створюється системами озвучування і звукопідсилення в приміщеннях, тобто різниця в рівнях звукового тиску в різних точках озвучуваної площі при підведенні до системи постійного рівня потужності. Однаковий рівень звукового тиску у різних точках приміщення забезпечити практично неможливо, оскільки має місце нерівномірна структура звукового поля через резонанси приміщення, через взаємодію випромінювачів один з одним, через нерівномірність АЧХ окремих гучномовців і т. д. Загальна нерівномірність для всіх точок у приміщенні не повинна перевищувати 6-8 дБ, а середній рівень звукового тиску повинен бути такий же, як в оптимальній зоні прослуховування. Для концертних залів це приблизно в 10-12-му ряду;

- *злитість звучання*, тобто відсутність помітної на слух луни. Особливу небезпеку при побудові систем озвучування є виникнення луни, що пурхає, яка викликає сильне тональне забарвлення звуку;
- *розбірливість мови*, яка є одним з визначальних параметрів у будь-якій системі озвучування та звукопідсилення. Для правильно спроектованої системи звукопідсилення розбірливість повинна бути в межах 90-97%;
- *локалізація джерел звуку*, поєднання зорового та слухового образу, *тембральне забарвлення звучання* та ін. - це найважливіші характеристики систем озвучування та звукопідсилення, які обов'язково повинні контролюватись за допомогою суб'єктивних експертиз [1].

У той же час застосування систем озвучування та звукопідсилення відкриває нові можливості для керування параметрами звукового поля в приміщеннях. Зокрема, дозволяє забезпечити:

- керування динамічним діапазоном;
- зміну розподілу рівнів гучності джерел на глядацьких місцях;
- формування різних звукових ефектів;
- керування акустичними характеристиками приміщення, наприклад, адаптивне придушення відлуння та ін.;
- комп'ютерне керування параметрами системи звукопідсилення в залежності від характеру звучання та умов у приміщенні.

Висновки до розділу

Головними завданнями при побудові систем озвучування є забезпечення заданого рівня гучності у всіх точках зали для глядачів, забезпечення розбірливості мови та співу, правильна локалізація слухового образу, збереження тембру звучання та забезпечення відсутності зворотного зв'язку.

У закритих приміщеннях небезпека самозбудження системи звукопідсилення найбільша на резонансних частотах приміщення, оскільки

саме на них відбувається максимальна передача енергії від гучномовця до мікрофону.

Загалом створення систем звукопідсилення, які забезпечують достатній рівень гучності, хорошу якість звучання та відсутність «збудження» за рахунок зворотного зв'язку, – процес, що потребує достатнього досвіду, використання сучасних методів розрахунків та вимірювань.

В залах, де застосовується система звукопідсилення, вимоги до структури ревербераційного процесу в приміщенні суттєво змінюються. Оскільки будь-яку точку зали можна забезпечити прямим звуком з високим рівнем звукового тиску за рахунок випромінювання від гучномовців, то немає необхідності добиватися високого рівня перших відображень від фронтальної частини зали, використовувати навісні щити, припортальні поверхні, що відбивають і т. д., як у залах з природною акустикою. Швидше, навпаки, в зоні навколо мікрофона краще забезпечити посилене звукопоглинання, а нестачу реверберації компенсувати шляхом застосування електронних процесорів просторової обробки.

РОЗДІЛ 4

ДОСЛІДЖЕННЯ АКУСТИКИ ПРИМІЩЕНЬ

4.1. Київський національний академічний театр оперети

Глядацька зала Київського національного театру оперети розрахована на 620 посадкових місць, які розташовані в 3 яруси (партер, бельєтаж, а також балкон), має прямокутну в плані форму з такими розмірами:

- довжина $L = 23,43$ м;
- ширина $B = 16,74$ м;
- висота (середня, оскільки підлога партеру має нахил) $H \approx 12,14$ м.

Як було зазначено в розділі 1, ще в Стародавній Греції були відкриті пропорції «золотого перерізу», при яких співвідношення висоти, ширини і довжини приміщення підпорядковується наступному закону:

$$L/B = B/H \text{ при } L = B + H,$$

де L – довжина, B – ширина, H – висота приміщення.

Підставивши в це співвідношення розміри зали, отримаємо:

$$L/B = 23,43/16,74 = 1,4 \approx B/H = 16,74/12,14 = 1,37;$$

$$L = B + H = 16,74 + 12,14 = 28,88 \text{ м.}$$

Об'єм приміщення:

$$V = L \times B \times H = 23,43 \times 16,74 \times 12,14 = 4761,5 \text{ м}^3.$$

Виходячи з обчисленого значення об'єму, отримаємо рекомендовані значення висоти H , ширини B і довжини L зали:

$$H = 0,62\sqrt[3]{V} = 0,62\sqrt[3]{4761,5} = 10,43 \text{ м;}$$

$$B = \sqrt[3]{V} = \sqrt[3]{4761,5} = 16,82 \text{ м;}$$

$$L = 1,62\sqrt[3]{V} = 1,62\sqrt[3]{4761,5} = 27,25 \text{ м.}$$

Отже, розрахунки показують, що лінійні розміри глядацької зали театру Оперети наближені до так званого «золотого перерізу». Деякі відмінності реальних розмірів від рекомендованих (в першу чергу довжини L і висоти H)

обумовлені наявністю балконів, оскільки при більшій довжині зали забезпечити прямим звуком достатньої потужності місця в партері під балконом було б проблематично, а на верхньому ярусі внаслідок збільшення довжини пробігу відображень від стелі і стін погіршилася би розбірливість мови.

Встановлення сучасної системи звукопідсилення позитивно вплинуло на нерівномірність розподілу звукового поля в залі, яка становить ± 5 Дб для природньої акустики і ± 3 Дб при використанні системи звукопідсилення (додаток 1). В основі звукового обладнання використовується цифровий мікшерний пульт DiGiCo SD 10 і лінійний масив K-array KP102W з сабвуферами K-array KMT218PW загальною потужністю 8 kW, розташований з лівої та правої сторони сцени. Крім основної акустичної системи, для більш рівномірного покриття зали використовуються додаткові акустичні системи, розташовані в партері, на бельетажі і балконі. Звуковий сигнал на них подається з затримкою в часі, в залежності від відстані до сцени.

Рекомендований для даного об'єму зали час реверберації, вказаний в Протоколі вимірювань акустичних характеристик головної зали Київського національного академічного театру оперети (без урахування об'єму сцени), $T_{\text{opt.}} = 1,2$ с для мови; $T_{\text{opt.}} = 1,7$ с для музики. Але після проведених в останні роки реконструкцій зали фактично виміряний час реверберації суттєво зменшився, особливо на частотах вище 2000 Гц і становить 0,8 с. Таке значення часу реверберації є недостатнім для комфортного виконання класичних вокальних партій. Оскільки виконавець не відчуває відзвуку зали, то, згідно ефекту Томатіса, він на рівні підсвідомості намагається підлаштувати свій голос під те, що чує і тому надто напружує голосові зв'язки. Але за допомогою системи звукопідсилення і використання електронних процесорів просторової обробки вдалося значною мірою компенсувати недоліки акустики зали.

4.2. Літній театр у Бучанському міському парку, м. Буча

Приміщення літнього театру являє собою критий майданчик прямокутної в плані форми, призначений для проведення театральних та музичних заходів в літній сезон, розташований в міському парку міста Буча Київської області. У цьому театрі проходить багато музичних фестивалів і концертів різних напрямів.

Заклад вміщує приблизно 350 глядачів, які розміщуються на окремих виносних стільцях, оскільки майданчик не обладнаний стаціонарними посадковими місцями.

Глядацька зала театру має приблизно такі розміри:

- довжина $L = 20$ м;
- ширина $B = 9$ м;
- висота $H = 5$ м.

У споруди театру відсутні бокові стіни, а отже відсутній їхній вплив на ревербераційний відзвук приміщення, який, за суб'єктивними оцінками, становить не більше 0,5 с. Основний внесок в його формування вносять звукові хвилі, що відбиваються від конструкції порталю сцени і задньої частини майданчика, оскільки стеля і підлога мають оздоблення, що розсіює і поглинає звук.

Заклад не має стаціонарної системи звукопідсилення, тому звукове обладнання доставляється і монтується під потреби кожного конкретного заходу. Нестача реверберації компенсується застосуванням електронних процесорів просторової обробки.

Загалом майданчик являє собою достатньо комфортне місце для проведення різних заходів, починаючи від виконання класичних творів і закінчуючи рок-концертами. Він не має конкретно визначених місць для монтажу звукового обладнання, відповідно це дає можливість в досить

широких межах експериментувати з розміщенням і налаштуванням системи звукопідсилення.

ВИСНОВКИ

Об'єктивні параметри, отримані за допомогою хвильової, статистичної або геометричної теорії, такі як час реверберації, структура резонансних частот, час і напрямки приходу ранніх відображень є основою для оцінки акустичних властивостей різних приміщень.

Загальне враження від акустики залів в першу чергу визначається значенням часу реверберації, особливо в області середніх та високих частот. Він завжди був одним з найважливіших факторів, який враховувався композиторами при написанні творів. Наприклад, композитори органної музики навмисно робили паузи, щоб було чутно довгу реверберацію в соборі. Для кожного виду музики та мовлення існують оптимальні межі зміни часу реверберації, які залежать від об'єму приміщення та частоти. В приміщеннях, де час реверберації надто короткий для даної музики чи мови, звук характеризується як «мертвий», «сухий», і навпаки, надмірна тривалість реверберації призводить до того, що їхня розбірливість погіршується.

Як було зазначено у висновках до розділу 1, якщо структура початкових відображень є оптимальною, звучання музики залишається добрим навіть за значного відхилення часу реверберації від рекомендованого, а це, в свою чергу, висуває вимогу до мінімального об'єму приміщення, яке не рекомендується порушувати. Саме тому навіть у невеликій концертній залі оптимальну структуру ранніх відображень можна отримати лише за заданих висоті та ширини зали перед естрадою. Відомо, наприклад, що звучання симфонічного оркестру в залі з низькою стелею суттєво гірше, ніж у залі з високою стелею. Таким чином, мінімальні розміри приміщення для виконання музики не пов'язані з його місткістю, а визначаються необхідною структурою початкових відображень.

Важливе значення має матеріал, яким оздоблені стіни та стеля. Найкращим є дерево. Звучання музики в залах, оброблених деревом, відрізняється гарним тембральним забарвленням. Навпаки, абсолютно

протипоказані залізобетонні конструкції, особливо тонкі, і штукатурка по сітці Рабіца. Звуки, відбиті від цих поверхонь, мають неприємний «металевий» відтінок.

Структура розподілу резонансних частот у приміщенні також істотно впливає на спектральний склад музики і мови. Для приміщень з малими розмірами дискретні резонанси потрапляють в область чутних частот і значно «забарвлюють» звучання. Щільність резонансних частот повинна бути досить велика, щоб не було помітно зміни тембру за рахунок резонансів. Виконання музики в приміщеннях з малим об'ємом неминуче призводить до спотворення тембру за рахунок дискретних резонансів, малого часу реверберації, недостатнього часового інтервалу між прямим звуком та першими відображеннями. Таким чином, тембр істотно залежить від розмірів і форми приміщення, від розподілу і величини коефіцієнта згасання в ньому, від наявності елементів, що розсіюють звук, забезпечують дифузне звукове поле, а також від багатьох інших факторів, з яких і складається мистецтво створення залів з хорошою акустикою.

Окрім акустичних параметрів приміщень, які визначають позитивні враження від прослуховування в них музики та мови, існує ціла низка факторів, що заважають. Наприклад, відлуння і луна, що пурхає. Сильний ефект спостерігається при довгих паралельних стінах, що характерно для багатьох сучасних залів. Наявність луни може призводити до порушення локалізації звукових джерел, що абсолютно неприпустимо в приміщеннях для прослуховування музики. До цих факторів також відносяться різні шуми, оскільки загальне враження від будь-якого виконання музики або мови може бути значною мірою зіпсоване, якщо в залі є високий рівень шумів, що заважають. У таких приміщеннях виявляється важко, а іноді практично неможливо забезпечити звукозапис. Рівень шумів у залі визначає динамічний діапазон музичного або мовного сигналу, що сприймається. Оскільки слабкі рівні корисного сигналу маскуються шумом, це призводить до значної втрати якості звуку музики і розбірливості мови.

В оцінці якості звучання музики та мови в різних залах істотну роль відіграє також і ціла низка суб'єктивних параметрів, які становлять значні труднощі, оскільки вимагають вирішення таких проблем, як вибір методів оцінки, вибір критеріїв оцінки, встановлення їх зв'язків з об'єктивними параметрами тощо. До того ж ці завдання пов'язані з психофізіологією та естетичною оцінкою звучання слухачами, зі смаками музикантів та акторів, тим більше, що акустичні характеристики, оптимальні для слухачів і для виконавців, суттєво відрізняються.

Загальне акустичне враження від приміщення, в якому прослуховуються музика і мова, складається з усіх перерахованих вище факторів. Створення концертних залів з гарною акустикою було і залишається найскладнішим завданням, яке донедавна вирішувалося виключно досвідом, інтуїцією та мистецтвом архітекторів та акустиків. Універсального рішення при їх будівництві не існує, оскільки різні жанри музики вимагають різних акустичних характеристик. Навіть у приміщеннях з правильно обраними формою та лінійними розмірами, пропорції яких наближаються до "золотого перерізу", виявляються недоліки звучання, усунення яких займає багато часу, сил та засобів. Тільки останніми роками у зв'язку з розвитком комп'ютерних технологій з'явилися можливості для точного математичного моделювання акустики залів, але ці методи ще не досить досконалі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Алдошина И. А., Приттс Р. Музыкальная акустика: Учебник. Санкт-Петербург: Композитор, 2006. 720 с.
2. Ньюелл Ф. Мастеринг. Погляд зсередини / пер. з англ. О. Кравченко, О. Науменко, О. Суботін. Київ: Комора, 2015. 200 с.
3. Pittman Aspen, Groove Tubes. Choosing & using microphones. Groove Tubes, 2004. 40 p. www.groovetubes.com
4. Newell P. R. Recording studio design. 3rd ed. Burlington, MA: Focal Press, 2012. 832 p.
5. Петелин Р. Ю., Петелин Ю. В. Adobe Audition. Обработка звука для цифрового видео. БХВ-Петербург, 2005. 400 с.
6. Петелин Р. Ю., Петелин Ю. В. Cubase SX 3: запись и редактирование музыки. БХВ-Петербург, 2005. 752 с.
7. Петелин Р. Ю., Петелин Ю. В. Propellerhead Reason – музыкальная студия. БХВ-Петербург, 2006. 224 с.
8. Медведев Е. В., Трусова В. А. Steinberg Nuendo 2: секреты виртуального звука. БХВ-Петербург, 2004. 432 с.
9. Катунин Г. П. Акустика помещений. Учебное пособие. Саратов, 2017. 191 с.
10. Севашко А. В. Звукорежиссура и запись фонограмм. Профессиональное руководство. М.: Альтекс-А, 2004. 432 с.
11. Сапожков М. А. Звукофикация открытых пространств. М.: Радио и связь, 1985. 304 с.
12. Сапожков М. А. Звукофикация помещений: Проектирование и расчёт. М.: Связь, 1979. 144 с.
13. Три взгляда на акустику помещений. Части 1, 2, 3. <http://electrovoice.com>.
14. Козюренко Ю. И. Основы звукорежиссуры в театре. Учебное пособие для театральных учебных заведений. М.: Искусство, 1975. 248 с.

15. Фурдуев В. В. Акустические основы вещания. М.: Государственное издательство литературы по вопросам связи и радио, 1960. 326 с.
16. Бьюик Питер. Живой звук. РА для концертирующих музыкантов: Пер. с англ. – М.: Шоу-Мастер, 1998. 178 с.
17. Ньюэлл Филип. Звукозапись: акустика помещений. Пер. с англ. А. Кравченко. М.: 2004. 197 с.
18. Лисса Зофья. Эстетика киномузыки. М.: Издательство Музыка, 1970. 487 с.