МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
імені Ю.М. ПОТЕБНІ

КАФЕДРА МІСЬКОГО БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ
(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота (проєкт)

магістр
(рівень вищої освіти)

на тему Реконструкція музичних залів цільового призначення

Виконав: студент 2 курсу, групи 8.1924-мбг-дн
спеціальності 192 Будівництво та цивільна інженерія
(код і назва спеціальності)
освітньої програми Міське будівництво та господарство
(назва освітньої програми)
Шліх Алі
(ініціали та прізвище)

Керівник доц., к.арх, Тишкевич О.П.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)
Рецензент проф., д.т.н, Банах В.А.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Запоріжжя
2026

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
імені Ю.М. ПОТЕБНІ

Кафедра міського будівництва і архітектури
Рівень вищої освіти магістр
Спеціальність 192 Будівництво та цивільна інженерія
(код та назва)
Освітня програма Міське будівництво та господарство

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
«01» 07 2025 року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ (ПРОЄКТ) СТУДЕНТОВІ (СТУДЕНТЦІ)

Шліх Алі
(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема роботи (проєкту) Реконструкція музичних залів цільового призначення

керівник роботи доц., к.арх, Тишкевич О.П.,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом ЗНУ від «10» 09 2025 року № 1303-с .

1 Строк подання студентом роботи 01.02.2026

2 Вихідні дані до роботи Актуальність обраного напрямку досліджень, значимість у сучасному житті, можливість розвинення проблематики, перспективи впровадження майбутніх досягнень, мета роботи, завдання до виконання обраних досліджень, об`єкт досліджень, предмет досліджень, передбачувані методи виконання досліджень

3 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Аналіз вітчизняного та світового досвіду проектування залів багатоцільового призначення, включаючи огляд сучасних об'єктів та історичну еволюцію акустичних просторів. Провести порівняння чинних норм України (ДБН В.1.1-31:2013, ДБН В.2.2-16:2019) із вимогами міжнародних стандартів щодо звукоізоляції та інклюзивності.

4 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'яз
креслень) Презентація із результатами аналітичних обґрунтувань науко
напряму досліджень, результатами експериментальних дослід
результати розрахунків із застосуванням сучасних інформаційних ме
досліджень

5 Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийн
1	Тишкевич О.П.		Shlikh A
2	Тишкевич О.П.		Shlikh A
3	Тишкевич О.П.		Shlikh A

6 Дата видачі завдання 01.09.2025

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Пр
1	Літературний огляд	01.11	
2	Розділ 1	15.11	
3	Розділ 2	01.12	
4	Розділ 3	15.12	
5	Розробка графічної частини	05.01	
6	Оформлення роботи	20.01	
7	Попередній захист	01.02	

Студент Shlikh Ali (підпис) Шліх Алі (ініціали та прізвище)

Керівник роботи (проєкту) (підпис) Тишкевич О.П. (ініціали та прізвище)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер (підпис) Гребенюк І.В. (ініціали та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Шліх Алі. Реконструкція музичних залів цільового призначення.

Кваліфікаційна випускна робота для здобуття ступеня вищої освіти магістра за спеціальністю 192 - Будівництво та цивільна інженерія, науковий керівник О.П. Тишкевич. Інженерний навчально-науковий інститут імені Ю.М. Потебні ЗНУ, кафедра міського будівництва і архітектури, 2026.

У магістерській роботі досліджено методи комплексного забезпечення нормативної звукоізоляції та формування оптимального акустичного середовища в музичних залах під час їх капітального ремонту та реконструкції. Шляхом порівняльного аналізу світового досвіду проєктування театрів та залів від античних амфітеатрів до сучасних об'єктів у Рабаті та Касабланці визначено ключові архітектурно-планувальні чинники впливу на якість звуку.

Встановлено, що значна частина існуючих закладів культури потребує професійної акустичної корекції через застарілість конструкцій, що призводить до дефектів звукосприйняття — надмірної гулкості, виникнення луни та низької розбірливості мовлення.

Визначено, що найбільш раціональним підходом до модернізації є перехід від масивних одношарових конструкцій до легких багатошарових систем із впровадженням вібророзв'язки.

Економічними розрахунками підтверджено, що впровадження запропонованих багатошарових рішень дозволяє знизити кошторисну вартість робіт на 35–45% порівняно з традиційними методами, при одночасному підвищенні рівня інклюзивності та комфорту приміщень.

Ключові слова: АРХІТЕКТУРНА АКУСТИКА, ЗВУКОІЗОЛЯЦІЯ, РЕВЕРБЕРАЦІЯ, БАГАТОШАРОВІ КОНСТРУКЦІЇ, МОДЕРНІЗАЦІЯ ЗАЛІВ, ЦЕНТРИ КУЛЬТУРНИХ ПОСЛУГ, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ.

ABSTRACT

Shlikh Ali. Reconstruction of Purpose-Built Music Halls.

Master’s qualification paper for the Master’s degree in specialty 192 – Construction and Civil Engineering. Scientific supervisor: O.P. Tyshkevych. Yu.M. Potebnia Engineering Educational and Scientific Institute of ZNU, Department of Urban Construction and Architecture, 2026.

The master’s thesis investigates methods for providing comprehensive standard sound insulation and creating an optimal acoustic environment in music halls during their capital repair and reconstruction. Through a comparative analysis of global experience in theatre and hall design—ranging from ancient amphitheatres to modern facilities in Rabat and Casablanca—key architectural and planning factors influencing sound quality have been identified.

It was established that a significant portion of existing cultural institutions require professional acoustic correction due to outdated structures, which leads to sound perception defects such as excessive reverberation, echoes, and low speech intelligibility.

It was determined that the most rational approach to modernization is the transition from massive single-layer structures to lightweight multi-layer systems incorporating vibration isolation.

Economic calculations confirmed that the implementation of the proposed multi-layer solutions reduces the estimated cost of works by 35–45% compared to traditional methods, while simultaneously increasing the level of inclusivity and comfort within the premises.

Keywords: ARCHITECTURAL ACOUSTICS, SOUND INSULATION, REVERBERATION, MULTI-LAYER STRUCTURES, MODERNIZATION OF HALLS, CULTURAL SERVICE CENTERS, ENERGY EFFICIENCY.

ЗМІСТ

	ВСТУП	8
Розділ 1	АНАЛІЗ АКТУАЛЬНОГО СТАНУ ПИТАННЯ НА СУЧАСНОМУ ЕТАПІ	11
1.1	Термінологічний апарат та нормативно-правове забезпечення дослідження	13
1.2	Історичний нарис формування та розвитку типології багатофункціональних залів	16
1.3	Актуальні передумови переходу до енергоефективної та ресурсозберігаючої моделі в будівництві	23
1.4	Шум, звук	24
1.5	Класифікація акустичних матеріалів	27
1.5.1	Функціональна типізація акустичних матеріалів	27
1.5.2	Класифікація акустичних матеріалів за властивостями	30
1.6	Аналіз світових та національних практик акустичного проєктування: виклики та проблемні аспекти	31
1.6.1	Лекційні зали та аудиторії	31
1.6.2	Зали драматичних театрів	33
1.6.3	Зали театрів опери та балету	36
1.6.4	Концертні зали	42
1.7	Висновки до розділу 1	45
Розділ 2	МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗВУКОІЗОЛЯЦІЇ ТА ФОРМУВАННЯ АКУСТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАЛІВ	47
2.1	Загальна характеристика об'єкта дослідження та аналіз застосовуваних оздоблювальних матеріалів	47
2.2	Способи проєктування ефективної звукоізоляції	49
2.2.1	Механізм проходження звуку через одношарову панель	49
2.2.2	Шляхи підвищення звукоізоляційної здатності огороджувальних конструкцій	55
2.2.3	Аналіз та нормування показників звукоізоляції елементів огородження	54
2.3	Архітектурна акустика: фундаментальні принципи проєктування залів	55
2.4	Фізико-математична модель процесу поширення звуку	58
2.5	Програмне забезпечення COMSOL Multiphysics	59
2.6	Висновки до розділу 2	62
Розділ 3	АНАЛІТИЧНА РОБОТА ТА РОЗРАХУНКОВЕ	

ОБҐРУНТУВАННЯ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ НАЙБІЛЬШ ЕФЕКТИВНОГО ВАРІАНТА ПРОЄКТУ 64
3.1 Розрахунки звукоізоляції перегородок 64
3.1.1 Розрахунок за варіантом А 64
3.1.2 Розрахунок за варіантом Б 69
3.2 Аналіз геометричної акустики залу 73
3.2.1 Реалізований варіант 74
3.2.2 Розроблений альтернативний варіант проєкту глядацького залу 75
3.3 Створення акустичних моделей приміщення в середовищі COMSOL Multiphysics та прогнозування показників реверберації 77
3.4 Економічне порівняння одношарової та двошарової конструкцій з точки зору звукоізоляційних характеристик 79
3.4.1 Економічний розрахунок 80
3.4.2 Вибір оптимального варіанта 82
3.5 Методологія інтегрованого забезпечення звукоізоляції та акустичної якості середовища в універсальних залах при проведенні реконструкції 83
3.6 Висновки до розділу 3 84
ОСНОВНІ ВИСНОВКИ 86
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 87

ВСТУП

Актуальність дослідження. У загальній масовій, рутинній практиці будівництва та реконструкції є чимало приміщень із дискомфортними акустичними умовами — достатньо згадати зали очікування на вокзалах, перонні зали метро, гулкі навчальні аудиторії великого об'єму, музичні зали з низькою чутністю тощо, де складно зрозуміти оголошення, що транслюються, або цілком розрізнити вимовлені фрази та нюанси музики.

Основними факторами, що впливають на акустичний комфорт приміщення, є: архітектурна геометрична акустика та звукоізоляційні матеріали, конструкції. У зв'язку з цим необхідно знати й розуміти основні положення акустики приміщень та застосовувати ці положення під час вирішення завдань, що виникають.

Архітектурна акустика — одна з основних наукових дисциплін, дані якої безпосередньо впливали та впливають на формування архітектурної форми приміщень. Закони поширення прямих і відбитих звукових хвиль у просторі, екстер'єрному та інтер'єрному, сьогодні досить добре відомі, однак при цьому у світі не так багато побудованих залів із хорошою акустикою для різних жанрів звукових вистав та мовленнєвих виступів.

Також не варто забувати про звукоізоляцію приміщень, вимоги до шуму та вібрацій, спричинених різними технологічними процесами та функціональним призначенням приміщень.

Одним із найбільш раціональних підходів до створення таких спеціальних приміщень, що потребують особливих умов звукового та акустичного середовища, є не нове будівництво, а капітальний ремонт і реконструкція існуючих будівель та споруд.

Капітальний ремонт включає в себе ліквідацію несправностей усіх зношених, пошкоджених елементів конструкцій, відновлення або заміну їх на більш довговічні чи економічні, що покращують експлуатаційні характеристики будівель, які ремонтуються. При цьому може здійснюватися

раціональна модернізація будівлі або об’єкта: зміна функціональної схеми, що впливає на логістичний процес та основні планувальні рішення, збільшення кількості та якості послуг, що надаються в цій будівлі, оснащення відсутніми видами інженерного обладнання, благоустрій навколишньої території, прилеглої до будівлі або споруди.

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є аналіз методу, що дозволяє комплексно та раціонально підійти до вирішення питань звукоізоляції та створення акустичного комфорту в будівлях із музичними залами під час капітального ремонту та реконструкції.

Завдання дослідження:

1. Провести аналіз планувальних рішень, форм і об’ємів приміщень, що впливають на акустичне середовище.
2. Виявити послідовність принципових рішень при виборі матеріалів та оцінити ефективність рішень одношарових і багатошарових конструкцій перегородок.
3. Оцінити техніко-економічну ефективність запропонованих проєктних рішень.
4. Визначити методи покращення звукоізоляції та акустичних характеристик приміщень.

Об'єкт дослідження. Об'єктом дослідження є процес формування акустичного середовища та забезпечення нормативної звукоізоляції музичних залів багатоцільового призначення в умовах капітального ремонту та реконструкції.

Предмет дослідження. Предметом дослідження є методи архітектурно-планувальної корекції залів, технологічні рішення багатошарових огороджувальних конструкцій та алгоритми комп’ютерного моделювання поширення звукових хвиль.

Методи дослідження. При вирішенні поставлених завдань використовувалися: аналіз науково-технічної літератури та нормативної бази щодо акустики приміщень; аналітичні методи розрахунку звукоізоляції та часу

реверберації огороджувальних конструкцій; метод трасування променів та скінченних елементів для аналізу акустичного поля у COMSOL Multiphysics; методи техніко-економічного порівняння варіантів одношарових і багатошарових конструкцій для визначення їхньої фінансової доцільності.

Наукова новизна одержаних результатів. Запропоновано інтегровану методику модернізації малих музичних залів, що поєднує геометричну оптимізацію (грейфер, скіс стелі) та впровадження багатошарових систем вібророзв'язки.

Уточнено вплив вузлів примикання огороджувальних конструкцій на фактичний індекс звукоізоляції R_w, що дозволяє мінімізувати акустичні дефекти без надмірного збільшення маси стін.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблено прикладні рекомендації щодо трансформації застарілих клубів у сучасні багатофункціональні простори згідно з концепцією Центрів культурних послуг. Доведено економічну ефективність використання легких багатошарових перегородок (Варіант А), що дозволяє знизити витрати на 35–45% порівняно з монолітними рішеннями при дотриманні норм ДБН В.1.1-31:2013.

Особистий вклад дослідника. Автором проведено порівняльний аналіз світового досвіду проектування театрів, виконано серію акустичних розрахунків у COMSOL Multiphysics та сформульовано комплексний метод раціональної реконструкції залів.

Апробація результатів роботи. Результати роботи доповідалися на XVIII університетської науково-практичної конференції студентів, аспірантів, докторантів і молодих вчених «МОЛОДА НАУКА-2025» з доповіддю «Історія виникнення залів різноманітного призначення»[17].

Структура та обсяг магістерської роботи. Магістерська робота складається з вступу, трьох розділів, основних висновків, списку використаних джерел, містить 90 сторінок, 27 рисунки, 13 таблиць, 43 найменування у списку використаних джерел.

РОЗДІЛ 1
АНАЛІЗ АКТУАЛЬНОГО СТАНУ ПИТАННЯ НА СУЧАСНОМУ ЕТАПІ

Одним із найбільш раціональних підходів до створення приміщень, що потребують особливих умов звукового та акустичного середовища, є не нове будівництво, а капітальний ремонт та реконструкція наявних будівель і споруд. У цій ситуації доцільно звернути увагу на заклади культури (центри культурних послуг).

В Україні модернізація культурної інфраструктури в громадах є пріоритетним напрямом, що регулюється Законом України «Про культуру» та Постановою Кабінету Міністрів України № 121 від 12 лютого 2020 р., яка затверджує Порядок та умови надання субвенції з державного бюджету місцевим бюджетам на розвиток мережі закладів культури.[1]

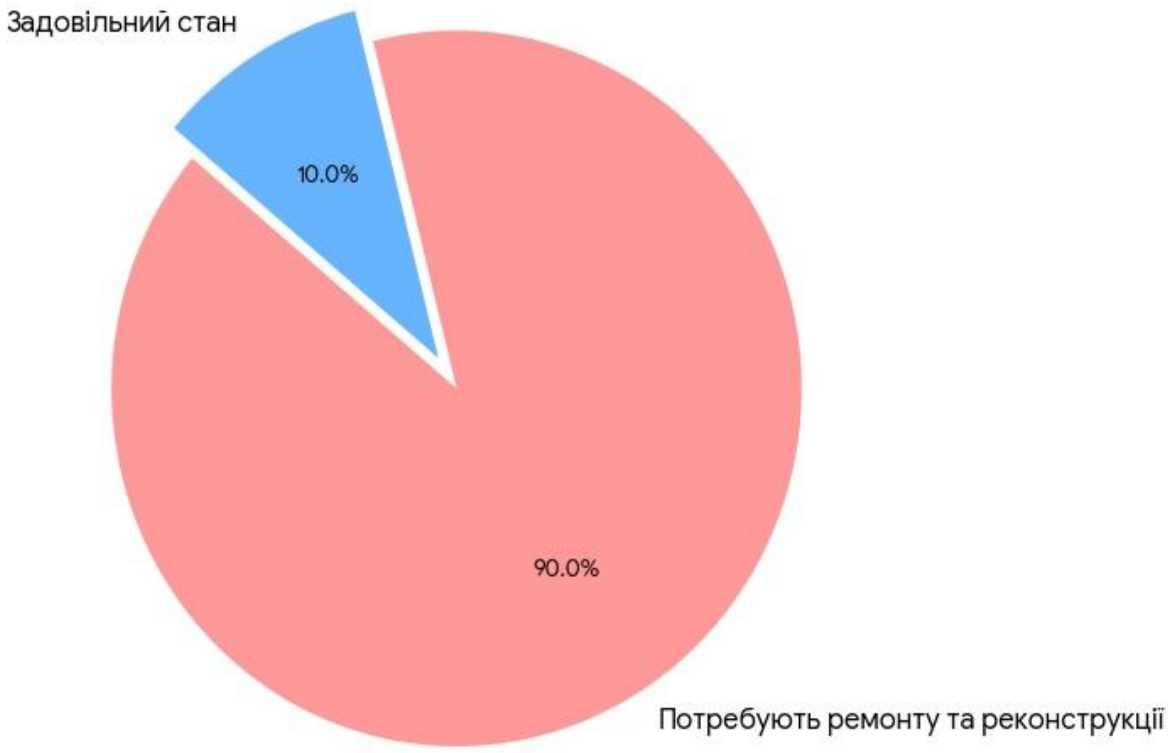


Рисунок 1.1 – Прогнозний стан об’єтів культури

Згідно зі Стратегією розвитку читання на період до 2032 року «Читання як життєва стратегія» та планами трансформації мережі закладів культури, в Україні впроваджується концепція Центрів культурних послуг (ЦКП).[3] Це передбачає реорганізацію застарілих клубів у сучасні багатофункціональні простори з належною акустикою, медіатеками та залами для глядачів.

Основні напрями модернізації згідно з українською нормативною базою:

- Реновація та енергоефективність: Приведення будівель у відповідність до сучасних будівельних норм (зокрема ДБН В.2.2-16:2019 «Культурно-видовищні та дозвіллєві заклади»), що забезпечують належну звукоізоляцію та акустичний комфорт.[5]
- Створення Центрів культурних послуг: Трансформація об’єктів у населених пунктах (зокрема в територіальних громадах до 50 тисяч осіб) для забезпечення рівного доступу до культурних благ.[3]
- Інклюзивність: Обов’язкове дотримання норм ДБН В.2.2-40:2018 «Інклюзивність будівель і споруд», що є критично важливим при реконструкції старих будинків культури.

За статистичними даними Міністерства культури та стратегічних комунікацій України, значна частина клубних закладів у сільській місцевості (близько 80-90% у певних регіонах) потребує капітального ремонту або повного оновлення матеріально-технічної бази.

Згідно з прогнозними показниками програм відновлення, до 2025–2028 років (рис.1.2) планується провести модернізацію та реставрацію сотень об’єктів культурної спадщини та місцевих клубів, що постраждали від занедбаності або бойових дій. Станом на сьогодні, понад 15 тисяч закладів культури в Україні потребують професійної акустичної корекції та технічного переоснащення для відповідності сучасним стандартам.

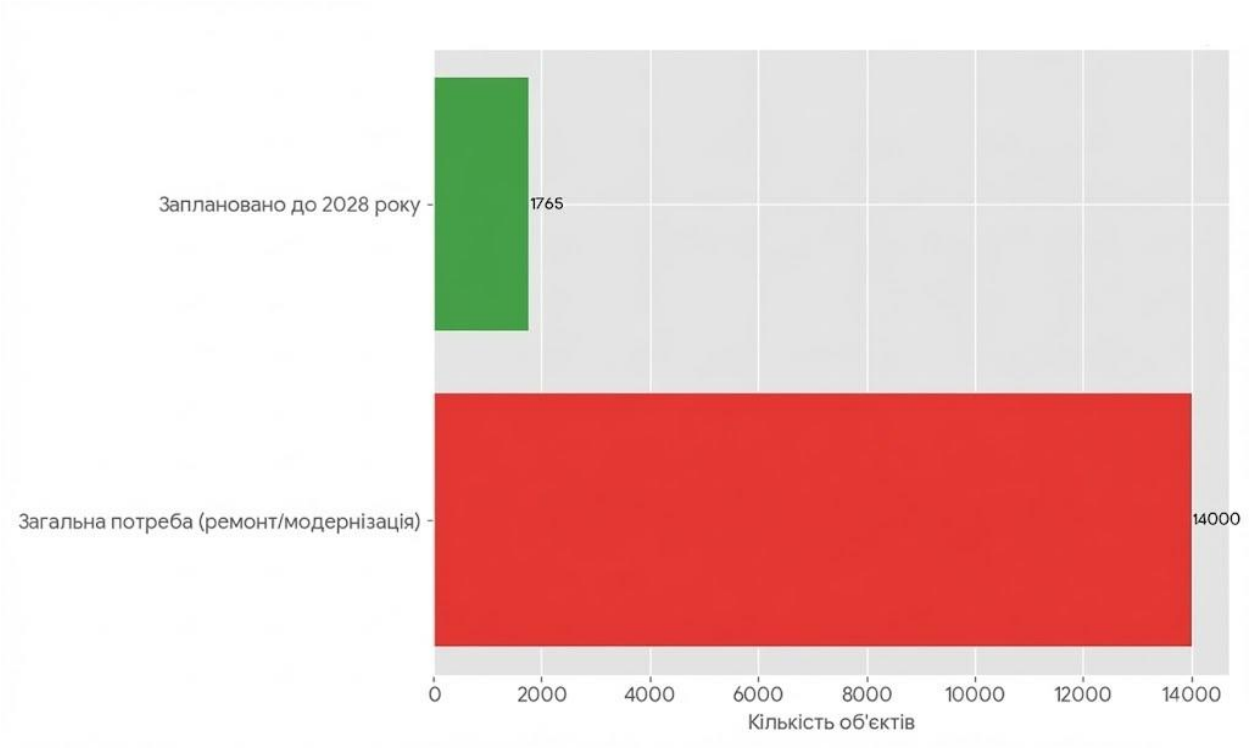


Рисунок 1.2 – Співвідношення згальної потреби та планових показників до 2028 року

1.1. Термінологічний апарат та нормативно-правове забезпечення дослідження

Терміни та визначення.

Загальний шум: Шум у певній ситуації в певний час і в певному місці, що зазвичай складається з шуму різних джерел — як рухомих (транспорт), так і стаціонарних (підприємства, обладнання будівель).

Фоновий (залишковий) шум: Частина загального шуму при відключенні одного або кількох конкретних джерел.

Постійний шум: Шум, рівень звуку якого за час вимірювання змінюється не більше ніж на 5 дБА при вимірюванні на часовій характеристиці «повільно» шумоміра згідно з ДСТУ EN 61672-1.

Непостійний шум: Шум, рівень звуку якого змінюється більше ніж на 5 дБА. Поділяється на той, що коливається, переривчастий та імпульсний.

Час реверберації Т, с: Час, за який рівень звукового тиску в приміщенні після вимкнення джерела звуку знижується на 60 дБ.

Допустимий рівень шуму: Рівень, який не викликає у людини значного занепокоєння та суттєвих змін показників функціонального стану організму.

Звукова потужність, Вт: Кількість енергії, що випромінюється джерелом шуму в одиницю часу.

Ізоляція повітряного шуму (звукоізоляція) R, дБ: Здатність огороджувальної конструкції зменшувати рівень звуку, що проходить крізь неї.

Коефіцієнт звукопоглинання α: Відношення величини непоглинутої поверхнею звукової енергії до величини енергії, що падає.

Реверберація: Явище поступового згасання звукової енергії в приміщенні після припинення роботи джерела звуку.

Середній коефіцієнт звукопоглинання: Відношення сумарної еквівалентної площі звукопоглинання Асум (включаючи поверхні, обладнання та людей) до сумарної площі всіх поверхонь приміщення.

Рівень звуку, дБА: Енергетична сума октавних рівнів звукового тиску, відкоригованих за частотною характеристикою «А».

Рівень звукової потужності, дБ: Десятикратний десятковий логарифм відношення звукової потужності до опорної ($W_0 = 10^{-12}$ Вт).

Шумозахисні екрани: Споруди (стінки, насипи, галереї), встановлені вздовж доріг для зниження шумового впливу на прилеглу територію.

Шум та акустичне середовище як фактори впливу на життєдіяльність людини підлягають жорсткому нормативному регулюванню. Акустичне проектування та захист від шуму в Україні регулюються наступними основоположними документами:

Державні будівельні норми (ДБН) та Закони :

- ДБН В.1.1-31:2013 «Захист територій, будинків і споруд від шуму»: Головний документ, що встановлює вимоги до звукоізоляції та допустимих рівнів шуму.[4]
- ДБН В.1.2-10:2021 «Основні вимоги до будівель і споруд. Захист від шуму та вібрації»: Визначає параметри безпеки експлуатації будівель.
- ДБН В.2.2-16:2019 «Культурно-видовищні та дозвіллєві заклади»: Містить специфічні вимоги до акустики залів будинків культури, театрів та клубів.[5]
- Закон України «Про забезпечення санітарного та епідемічного благополуччя населення» (Стаття 24): Регламентує обов'язки щодо захисту від шуму в житлових та громадських місцях.

Основні вимоги згідно з українськими нормами:

a. Захист від зовнішнього шуму: Проектування фасадів та розміщення будівлі мають забезпечувати комфорт усередині приміщень.

b. Міжкімнатна ізоляція: Обов'язкове дотримання індексів Rw для перегородок між залами та іншими приміщеннями.

c. Акустика залів: У будинках культури час реверберації має відповідати нормативним значенням залежно від об’єму залу та його призначення (мовлення, музика).

d. Інклюзивність: Врахування акустичного комфорту для людей з вадами слуху (згідно з ДБН В.2.2-40:2018).[6]

Стандарти вимірювань та оцінки (ДСТУ) **:**

- ДСТУ EN ISO 717-1:2022: Оцінка звукоізоляції повітряного шуму в будівлях та огороджувальних конструкціях.
- ДСТУ EN ISO 717-2:2022: Оцінка звукоізоляції ударного шуму.[8]
- ДСТУ EN ISO 10140 (частини 2, 4): Лабораторні вимірювання звукоізоляції елементів будівель.
- ДСТУ ISO 1996-1:2021: Акустика. Опис, вимірювання та оцінка шуму на місцевості.

- ДСТУ EN ISO 3382-1:2014: Вимірювання параметрів акустики приміщень (включаючи час реверберації).

Санітарні норми:

- Наказ МОЗ України від 06.06.2023 № 1013: Затверджує Державні санітарні норми допустимих рівнів шуму в приміщеннях житлових та громадських будинків і на території житлової забудови.[10]

1.2. Історичний нарис формування та розвитку типології багатофункціональних залів

Витоки архітектурної та будівельної акустики сягають глибокої давнини. Акустичні завдання в ті часи ставилися та вирішувалися у зв’язку з будівництвом гігантських споруд — спочатку культових, а згодом й інших громадських об’єктів, таких як зали для зборів та видовищ.[14]

Наші попередники в Ассирії, Вавилоні та Давньому Єгипті у 5–2 тисячоліттях до н. е. зводили храми та зали, що вирізнялися виразною архітектурою та потужним художнім образом. Монументальні будівельні конструкції, унікальні скульптури та живопис — усе було спрямоване на те, щоб вразити відвідувачів величчю, створити відчуття особливого простору та містичної атмосфери, наче створеної божественними силами. Давнім будівельникам та архітекторам, очевидно, вже були відомі закони поширення та відбиття звукових хвиль у залах. Застосовуючи ці знання, вони досягали приголомшливих акустичних ефектів, що вражали уяву відвідувачів.

Інші, проте не менш сильні почуття викликало мистецтво зведення величних споруд у Давній Греції (VII–IV ст. до н. е.) — однієї з найрозвиненіших світових цивілізацій.[14] На відміну від мистецтва Давнього Єгипту, в основі давньогрецького світогляду лежало уявлення про силу та красу людини, її невід’ємний зв’язок із навколишнім середовищем, світом та суспільним життям. Мистецтво Давньої Греції вирізнялося гармонійністю та світлими образами. Давнім грецьким храмам, залам та іншим громадським

спорудам притаманна особлива пропорційність частин конструкцій, що й визначило їхні унікальні акустичні характеристики. Раціональність проектних рішень та акустичних прийомів, застосованих давніми греками, була повністю підтверджена сучасною наукою.



Рисунок 1.3 - Еволюція акустичних просторів

Історія розвитку громадських споруд: від одейонів до амфітеатрів

Поряд із будівлями, призначеними для спілкування з вищими божествами, значна увага приділялася спорудам загального громадського призначення. Видовищні будівлі Давньої Греції поділялися на два основні типи: одейони та театри.

Одейони — це порівняно невеликі криті споруди, призначені для репетицій та вистав з обмеженою кількістю артистів зазвичай без музичного супроводу і слухачів.

Театри — видовищні споруди відкритого типу з величезною місткістю (від 1 000 до 20 000 осіб). Лави для глядачів розташовувалися на похилій площині, зазвичай оточуючи півколом центральний майданчик.

Елементи архітектурних особливостей грецьких зодчих були перейняті їхніми римськими наступниками. Римські відкриті театри в окремих аспектах були досить подібними до грецьких, проте, на відміну від попередників, вони зводилися не лише на природних схилах рельєфу, а й на горизонтальних

ділянках землі завдяки використанню складної системи арок та склепінь.

Класичним прикладом такої споруди є амфітеатр Флавіїв (Колізей), розрахований на 56 000 осіб, зведений та введений в експлуатацію у 80–90 роках н. е.



Рисунок 1.4 - Колізей (Colosseum) — амфітеатр Флавіїв

У наш час встановлення систем звукопідсилення навіть у залах місткістю 200–300 осіб є звичною та необхідною справою. Саме тому фантастичні свідчення істориків про місткість давньогрецьких та римських театрів, що обходилися виключно природною акустикою, настільки вражають. Наприклад, театр Помпея одночасно вміщував 17,8 тисяч осіб, а театр Марцелла в Римі — 20 000 осіб.

Навіть якщо ця інформація дещо перебільшена (за сучасними оцінками, згадані театри вміщували відповідно 5 000 та 7 000 глядачів), видається дивом те, що в цих величезних спорудах вдавалося досягати задовільної звучності та розбірливості мовлення на глядацьких місцях.

Залишається припустити: або органи слуху тогочасних відвідувачів видовищних споруд були в кілька разів чутливішими за сучасні, або ж давні архітектори володіли невідомими методами акустичних прийомів, які дозволяли досягати достатньої гучності та розбірливості звуку на місцях для глядачів.



Рисунок 1.5 - Залишки античного рівня театру Марцелла. Фотографія близько 1860 р.

Відомо, що маски акторів на сцені, які зображували різні емоції дійових

осіб, мали таку форму, що слугувала своєрідним рупором і спрямовувала звук у бік слухачів.

Римський діяч, мислитель, учений та поет Лукрецій Кар у відомому трактаті «Про природу речей» виклав тогочасні уявлення про акустику, зокрема й про акустику зальних приміщень. Також у «Десяти книгах про архітектуру» [Вітрувія] було проаналізовано досвід античних архітекторів та сформульовано низку положень, які використовуються при будівництві театрів і залів у наш час.

Наші попередники мали чітке уявлення про природу звукових хвиль та небезпеку пізніх відбивань, здатних викликати ехо (луну). Знання акустичних принципів при проєктуванні приміщень іноді знаходило несподіване застосування. До наших днів дійшли «галереї шепоту», що розташовувалися у Давньому Римі та Китаї.

У них, завдяки грамотно розташованим та спеціально спрямованим відбивним поверхням огороджувальних конструкцій, тихі звуки поширювалися на досить великі відстані. Це дозволяло людям, що перебували за десятки метрів один від одного, спілкуватися, не напружуючи голос.

Неподалік від м. Сиракузи на о. Сицилія знаходяться найдавніші каменоломні. За давніми переказами, в одну з галерей, названу «вухом Діонісія»(рис 1.6) , поміщали ув'язнених. Нагорі, завдяки спроєктованим каналам у вигляді щілин, було чути всі розмови полонених між собою. Таким чином ті, хто їх утримував, отримували необхідну таємну інформацію.

Особливі звукові канали також допомагали правителям у їхніх палацах підслуховувати секретні розмови підданих, які вважали, що їх не чують, і на основі цього оцінювалася їхня відданість.

Наприкінці дохристиянського періоду вивчення будівельної акустики як частини фізики перестало розвиватися. Вважалося, що велику роль у цьому відіграв авторитет грецького мислителя Аристотеля (384–322 рр. до н. е.), який стверджував, що фізичне дослідження не гідне уваги вченого. Навіть за часів Леонардо да Вінчі (близько 1,5 тис. р. н. е.) тогочасні будівельники та

архітектори користувалися принципами влаштування акустики приміщень, запозиченими з античного досвіду зведення.



Рисунок 1.6 - Вухо Діонісія (італ. L'Orecchio di Dionisio)

Давні знання про акустичне середовище приміщень знайшли практичне застосування при зведенні монументальних будівель раннього та пізнього середньовіччя. У католицьких храмах створювалася ілюзія музики, що спускається з небес. Це не випадкова вдача будівельників, а усвідомлене використання особливих архітектурних форм і об'ємів та певне розташування музичного інструмента і хору.

Специфічними акустичними характеристиками вирізнялися також і православні споруди. Голоси священників і церковного хору відбивалися від купольної верхньої частини перекриття споруди і спрямовувалися вниз, до вірян. У них виникало відчуття незвичного звучання, яке можна було почути тільки там. Для створення незвичного акустичного середовища архітектори

закладали в конструкції стін і склепінь різні глиняні «голосники». Це були своєрідні особливі акустичні резонатори, що працювали на посилення.

У XVIII та на початку XIX ст. увага дослідників перемістилася на споруди концертних і театральних залів. Цьому сприяв бурхливий розвиток нового музичного мистецтва — опери. Завдяки оптимальному вибору геометричної форми, об’ємів та розмірів приміщень, а також раціональному розміщенню звукопоглинальних матеріалів, у цих залах вдавалося створити належні умови як для глядачів, так і для виконавців: акторів, музикантів та поетів.

У XIX столітті на зміну розмитим уявленням античного світу про будівельну акустику прийшли систематизовані знання. Наприкінці XIX — на початку XX століття В. Себін (Wallace Sabine) провів низку дослідів, що заклали фундамент теорії архітектурно-будівельної акустики. Він вперше виявив кількісний взаємозв’язок між геометричними показниками приміщень та їхніми акустичними властивостями.

Себін досліджував акустичні процеси, що відбуваються після вимкнення джерела звуку, а саме: затримку багатократно відбитих звукових хвиль та їх поступове згасання внаслідок поглинання енергії поверхнями та перешкодами. Першопричиною цього явища є енергія, що передається залу від джерела звукової хвилі.

Попри значні практичні успіхи, теорія В. Себіна (статистична теорія) зазнала суттєвої критики. Було доведено, що після припинення дії джерела процес затухання відбувається не під впливом вимушених коливань, а в результаті згасання власних (резонансних) коливань, збуджених джерелом звуку, із частотами, що залежать від форми та розмірів конкретного приміщення.

Цей підхід, що отримав назву хвильової теорії, був ґрунтовно вивчений такими вченими, як Болт, Морз, Дрейзен, Фурдуєв та інші. Варто зауважити, що ще Дж. Стретт (лорд Релей), спираючись на математичне рішення Дюамеля, вважав за можливе досліджувати акустику приміщень саме з

позицій хвильової теорії.

До початку XX ст., тобто до появи праць В. Себіна, основна увага приділялася аналізу траєкторій поширення потоків звукової енергії — прямого звуку та хвиль, відбитих від перешкод. Це так звана геометрична (променева) теорія. Вона є найдавнішою, проте й сьогодні її успішно використовують, особливо під час проєктування залів великої місткості.

На сьогодні немає єдиної теорії, яка б пояснювала всі акустичні явища та звукові процеси в приміщеннях і дозволяла з єдиних позицій вирішувати конкретні завдання оптимізації у залах різного призначення. До того ж ці завдання тісно пов’язані з психофізіологією та естетичною оцінкою звучання слухачами, а також зі смаками музикантів та акторів. Такі питання мають специфічний характер, тому ми не будемо їх торкатися.

Проблеми акустики залів великої місткості, обладнаних системами звукопідсилення, також залишаються поза межами цієї роботи. Вона присвячена виключно розгляду основних положень та практичному застосуванню трьох чинних теорій — статистичної, хвильової та геометричної.

1.3. Актуальні передумови переходу до енергоефективної та ресурсозберігаючої моделі в будівництві

На сьогодні існує величезна кількість будівель із музичними залами, у яких надмірний об'єм, некоректні габарити, форми стелі чи підлоги відіграють негативну роль у забезпеченні загального акустичного комфорту приміщень.

Звукоізоляція між глядацьким залом та іншими приміщеннями залежить від взаємного розташування цих приміщень і може мати різні значення. Очевидно, що суміжні приміщення передають шумовий вплив одне одному значно інтенсивніше, ніж якби вони були розосереджені. Тому варто приділити особливу увагу функціональній схемі будівлі: оцінити та розташувати максимально вигідно, з погляду захисту від шуму, ті приміщення,

що потребують ретельного вирішення питань звукоізоляції та акустики.

Звукоізоляція репетиційних залів та класів є надзвичайно важливою і має бути детально продуманою. Водночас звичайного обшивання стін, звуко- та віброізоляції підлог, перегородок чи стель може бути недостатньо. У комплексі визначальною є не стільки кількість чи товщина звукоізоляційного акустичного матеріалу, скільки якість виконання з'єднань, примикань та конструктивних вузлів у місцях сполучення різних елементів, що підлягають процедурі підвищення звукоізоляції.[15]

Правильне вирішення вузлів та контроль якості монтажу підвищують ефективність звукоізоляції, зменшують витрати на акустичні матеріали та не «з'їдають» корисну площу приміщення.

1.4. Шум, звук

Звук — це коливальний процес, що являє собою черговані хвилі згущення і розрідження пружного середовища і хвилеподібно поширюється в цьому середовищі. Будь-яке тіло, що коливається, стикаючись із навколишнім середовищем, утворює звукові хвилі і є джерелом звуку. Хвилі згущення призводять до підвищення тиску в пружному середовищі, а хвилі розрідження — до зниження. Звідси з'явився термін звуковий тиск — це змінний тиск, що виникає додатково до атмосферного тиску при проходженні звукових хвиль.

Звуки розрізняються за низкою ознак — це сила звуку, частота звуку. Чим вища частота коливань звукової хвилі, тим вищий звук, який ми чуємо.

Шум — це, як правило, сукупність звуків різної частоти і сили. З точки зору впливу на людину шум оцінюється в частотному діапазоні від 45 до 11 тис. Гц, який включає дев'ять октавних смуг.

Таблиця 1.1 — Рівні шуму

Рівень шуму	Опис шуму
22 дБА	Такий рівень шуму характеризується як абсолютна тиша.
25–26 дБА	Тиша. Рівні шуму перебувають на порозі чутності та ледь вловлюються людським вухом.
30 дБА, 31 дБА, 32 дБА, 36 дБА	Дуже тихо. Рівні шуму тихі, але добре чутні. При вимірюваннях можна виявити перевищення фонового рівня (без чутних шумів) на 3–5 дБА.
40–45 дБА	Шум слабо чутний. Рівень шуму тихий, але шум чутно чітко. Перевищення фону більш ніж на 3–5 дБА.
46–59 дБА	Нормальний рівень шуму. Шум не порушує умов комфорту.
60 дБА, 65 дБА, 75 дБА	Шум досить гучний. Виходить за межі комфортних умов.
78 дБА, 85 дБА, 88 дБА, 100–102 дБА, 110–114 дБА	Дуже гучний шум.
120 дБА	Больовий поріг.
130 дБА, 150 дБА	Нестерпний шум. Перебувати в таких умовах можна тільки в захисних навушниках.
180 дБА	Смертельний рівень шуму.

Шуми, що проникають у приміщення, поділяються на зовнішні та внутрішні.

Внутрішні шуми, які виникають усередині будівлі, можна розділити на

побутові, а також механічні, що пов'язані з роботою інженерного та санітарно-технічного обладнання (такими є ліфти, вентилятори, насоси тощо).

До другої групи належать шуми, що створюються людьми, які перебувають у будинку: розмови, крики, плач, спів, гра на різних музичних інструментах.

Рівні шуму поблизу цих джерел можуть досягати значних величин:

- Звуки від гучних музичних інструментів створюють шум від 80 до 90 дБ;
- Гучна розмова та плач — від 70 до 80 дБ;
- Розмова середньої гучності — від 60 до 65 дБ.

При застосуванні засобів захисту від шуму, насамперед, необхідно з’ясувати його вид.

Види шуму:

- Повітряний — звукові коливання, що поширюються в повітрі.
- Ударний — звукові коливання, що виникають при механічному впливі на будь-яку конструкцію (зазвичай це підлога, перекриття, стіна).
- Структурний — звукові коливання, що поширюються безпосередньо в матеріалі конструкції та передаються вібруючим обладнанням.
- Звукоізоляція огороджувальних конструкцій — властивість будівельних конструкцій затримувати частину енергії звукових хвиль, що падають на них, шляхом їх відбиття або перетворення в енергію власних коливань.
- Звукопоглинання — властивість будівельних конструкцій (або спеціальних матеріалів) поглинати енергію звукових хвиль, перетворюючи її в теплову енергію.
- Віброізоляція — властивість будівельних конструкцій або спеціальних пристроїв затримувати частину енергії вібрації шляхом відбиття або перетворення її в енергію власних коливань.

1.5. Класифікація акустичних матеріалів

Вибір матеріалу для створення звукового комфорту в приміщенні залежить також від характеру самого звуку. Електроприлади, що працюють, телевізор, приймач, гучні розмови, звуки тварин, шум машин тощо створюють повітряний шум.

Якщо ж відбувається безпосередній механічний вплив на перекриття: свердління стін, забивання цвяхів, ходьба, звук від пересування меблів тощо, то йдеться про ударний шум.

Коли тримальні конструкції будинку жорстко з’єднані між собою без застосування звукоізоляційних пружних прокладок, то шум будь-якого характеру поширюється конструкціями будівлі та перетворюється на структурний шум.

1.5.1. Функціональна типізація акустичних матеріалів

Звукопоглинальні матеріали призначені для застосування в конструкціях звукопоглинальних облицювань внутрішніх приміщень і для окремих звукопоглиначів для зниження звукового тиску в приміщеннях виробничих і громадських будівель.

Звукопоглинальні матеріали застосовуються у звукопоглинальних облицюваннях виробничих приміщень і технічних пристроїв, що потребують зниження рівня шумів (промислові цехи, друкарські бюро, установки вентиляції та кондиціонування повітря та ін.), а також для створення оптимальних умов чутності та поліпшення акустичних властивостей приміщень громадських будівель (глядацькі зали, аудиторії, радіостудії тощо).

Звукопоглинальна здатність матеріалів зумовлена їхньою пористою структурою і наявністю великого числа відкритих сполучених між собою пор, максимальний діаметр яких зазвичай не перевищує 2 мм (загальна пористість повинна становити не менше 75 % за об’ємом). Велика питома поверхня

матеріалів, що створюється стінками відкритих пор, сприяє активному перетворенню енергії звукових коливань у теплову енергію внаслідок втрат на тертя.

Ефективність звукопоглинальних матеріалів оцінюється коефіцієнтом звукопоглинання, що дорівнює відношенню кількості поглинутої енергії до загальної кількості енергії звукових хвиль, що падає на матеріал.

Звукопоглинальні матеріали мають волокнисту, зернисту або комірчасту будову і можуть володіти різним ступенем жорсткості (м’які, напівжорсткі, тверді).

М’які звукопоглинальні матеріали виготовляються на основі мінеральної вати або скловолокна з мінімальною витратою синтетичного сполучного (до 3 % за масою) або без нього. До них належать мати або рулони з об’ємною масою до 70 кг/м³, які зазвичай застосовуються в поєднанні з перфорованим листовим екраном (з алюмінію, азбестоцементу, жорсткого полівінілхлориду) або з покриттям пористою плівкою. Коефіцієнт звукопоглинання цих матеріалів на середніх частотах (250–1000 Гц) від 0,7 до 0,85.

До напівжорстких матеріалів належать мінераловатні або скловолокнисті плити з об'ємною масою від 80 до 130 кг/м^3 при вмісті синтетичного сполучного від 10 до 15% за масою, а також деревноволокнисті плити з об'ємною масою 180–300 кг/м^3. Поверхня плит покривається пористою фарбою або плівкою. Коефіцієнт звукопоглинання напівжорстких матеріалів на середніх частотах становить 0,65–0,75. До цієї ж групи входять звукопоглинальні плити з пористих пластмас, що мають комірчасту будову (пінополіуретан, полістирольний пінопласт та ін.).

Звукоізоляційні матеріали застосовуються як прокладки (прошарки) у багатошарових огороджувальних конструкціях для поліпшення ізоляції огороджень від ударного та повітряного звуків.

Звукоізоляційні прокладні матеріали застосовуються у вигляді рулонів або плит у конструкціях міжповерхових перекриттів, у внутрішніх стінах і

перегородках, а також як віброізоляційні прокладки під машини та обладнання. Характеризуються малим значенням динамічного модуля пружності, що, як правило, не перевищує 1,2 МН/м^2 (12 кгс/см^2) при навантаженні 20 МН/м^2 (200 кгс/см^2).

Пружні властивості скелета матеріалу та наявність повітря, що міститься в його порах, зумовлюють гасіння енергії удару та вібрації, що сприяє зниженню структурного та ударного шуму.

Розрізняють звукоізоляційні прокладні матеріали, що виготовляються з волокон органічного або мінерального походження (деревноволокнисті плити, мінераловатні та скловолокнисті рулони і плити товщиною від 10 до 40 мм, об'ємна маса 30–20 кг/м^3), а також з еластичних газонаповнених пластмас (латекси синтетичних каучуків, пінополіуретан, пінополівінілхлорид), що випускаються у вигляді плит товщиною від 5 до 30 мм; об'ємна маса еластичного пінополіуретану 40–70 кг/м^3, пінополівінілхлориду 70–270 кг/м^3.

У низці випадків для цілей звукоізоляції застосовуються штучні прокладки з литої або губчастої гуми.

Вібропоглинальні матеріали призначені для послаблення згинних коливань, що поширюються жорсткими конструкціями (переважно тонкими), з метою зниження випромінюваного ними звуку, а також для поглинання вібрації та шумів, що виникають під час роботи інженерного та санітарно-технічного обладнання.

Вібропоглинальні матеріали виготовляють як на основі натурального волокна (базальтова вата, каолінова вата, спучений перліт, піноскло, шамот), так і на основі синтетичних субстанцій (пінополіестер, пінополіуретан, пінополіетилен, пінополіпропілен).

Найбільш довговічною є мінеральна вата з гірських порід, у більшості випадків — базальтова. Серед її додаткових переваг виділяють гідрофобність, вогнестійкість, паропроникність та екологічну безпеку.

Для усунення передачі ударного звуку застосовуються конструкції «плаваючих» підлог. Пружні прокладки вкладаються між тримальною плитою

перекриття та чистою підлогою. Також необхідно пружними прокладками відокремлювати конструкцію підлоги від стін по периметру приміщення.

Ефективними звукоізоляційними виробами з волокнистою структурою є мати та плити напівжорсткі мінераловатні й скловатні на синтетичному сполучному, мати та рулони прошивні скловатні, деревноволокнисті ізоляційні плити, пориста гума, полівінілхлоридні та поліуретанові пінопласти.

Виготовляють стрічкові та смугові прокладки довжиною від 1000 до 3000 мм і шириною 100, 150, 200 мм, а також поштучні прокладки — довжиною та шириною 100, 150, 200 мм. Вироби з волокнистих матеріалів застосовуються тільки в оболонці з водостійкого паперу, плівки або фольги.

Вібропоглинальними матеріалами слугують деякі сорти гуми та мастики, фольгоізол, листові пластмаси. Вібропоглинальні матеріали наносяться на тонкі металеві поверхні, при цьому створюється ефективна вібропоглинальна конструкція з високим перетворенням енергії на тертя.

1.5.2. Класифікація акустичних матеріалів за властивостями

1.За формою звукопоглинальні матеріали та вироби поділяють на:

- штучні (блоки, плити);
- рулонні (мати, смугові прокладки, полотна);
- пухкі;
- сипкі (вата мінеральна та скляна, керамзит, спучений перліт та інші пористі зернисті матеріали).

2.За жорсткістю звукопоглинальні матеріали поділяють на:

- м’які;
- напівжорсткі;
- жорсткі;
- тверді.

3.За структурними ознаками звукопоглинальні матеріали та вироби

поділяють на:

- пористо-зернисті;
- пористо-волокнисті;
- пористо-комірчасті (із комірчастого бетону та перліту);
- пористо-губчасті (пінопласти, гуми).

4.За горючістю (займистістю) акустичні матеріали та вироби поділяють на три групи:

- горючі;
- важкогорючі;
- негорючі.

1.6. Аналіз світових та національних практик акустичного проєктування: виклики та проблемні аспекти

1.6.1. Лекційні зали та аудиторії

Таблиця 1.2 - Порівняльна характеристика параметрів національних та закордонних залів і аудиторій

Зал	Місткість, осіб	Об'єм, $м^3$	Питомий об'єм, $м^3$/особ.	Макс. відстань від лектора, м	Оцінка
Велика лекційна аудиторія ІННІ (ауд. 94)	250	1875	7,5	18	Задов.
Лекційний зал Палацу культури і науки у Варшаві	400	1800	4,5	17	Відм.

Зал	Місткість, осіб	Об'єм, $м^3$	Питомий об'єм, $м^3$/особ.	Макс. відстань від лектора, м	Оцінка
Актова зала ІННІ ім. Ю.М. Потебні ЗНУ	450	2730	6,5	19	Добре
Актова зала Львівської політехніки (Головний корпус)	550	3850	7,0	22	Задов./Добре

Для лекційних залів рекомендований оптимальний питомий об'єм становить 4–5 $м^3$/особ. Перші два зали (типова аудиторія ІННІ та зал у Варшаві) повністю відповідають цим вимогам і не викликають жодних зауважень.

Велика аудиторія ІННІ ім. Потебні (ауд. 94) / Велика аудиторія Львівської політехніки:

- Проблема: Об'єм приміщення значно завищений (питомий об'єм становить близько 7,5 $м^3$/особ.).
- Параметри: Час реверберації становить 2,3 с (на частоті 500 Гц) та 1,9 с (на частоті 2000 Гц) при нормі 1,0–1,1 с.
- Наслідки: Приміщення характеризується надмірною «гулкістю», через що суттєво погіршується розбірливість мовлення. Внаслідок великої висоти стелі спостерігається значне запізнення перших відбиттів звуку в передній частині аудиторії.

Актова зала (ІННІ ЗНУ/ Львівська політехніка):

- Проблема: При використанні цих залів суто для лекційних цілей усі недоліки, властиві великим аудиторіям, різко посилюються.
- Акустичні умови: Через значний загальний об'єм та високі стелі акустичні умови для проведення лекцій без спеціальних систем звукопідсилення є незадовільними. Велика дистанція до останніх рядів та

відсутність ранніх відбиттів роблять сприйняття мовлення лектора фізично виснажливим для слухачів.

1.6.2. Зали драматичних театрів

Таблиця 1.3 - Порівняльний аналіз параметрів національних та світових драматичних театрів

Театр	Місткість, осіб	Об'єм, $м^3$	Питомий об'єм, $м^3$/особ.	Макс. відстань від сцени, м	Оцінка
Театр «Олів'є» (Королівський національний театр, Лондон)	1150	6000	5,2	20	Відм.
Комеді Франсез (Зал Рішельє, Париж)	800	3800	4,7	18	Відм.
Бургтеатр (Відень)	1340	8500	6,3	28	Добре
Драматичний театр (Сіднейський оперний театр)	544	2500	4,6	15	Відм.
Олд Вік (Лондон)	1000	5000	5,0	22	Добре
Національний театр ім. Івана Франка (Київ)	800	4500	5,6	22	Добре
Запорізький театр ім. В. Г. Магара	750	4300	5,7	21	Відм.

Запорізький академічний обласний український музично-драматичний

театр імені В. Г. Магара :

- Питомий об'єм. Зал має місткість близько 750–800 осіб при загальному об’ємі приблизно 4300 м3. Питомий об'єм становить 5,4–5,7 м3/особ. Це дещо вище за «сухий» стандарт драматичного театру, але ідеально підходить для музично-драматичного формату, де важлива підтримка як голосу актора, так і звучання оркестру.
- Дифузія звуку. Головна перевага театру ім. Магара — велика кількість ліпнини, пілястр, розет та барельєфів. Ці архітектурні деталі працюють як високоефективні дифузори. Вони розбивають звукову хвилю на дрібні фрагменти, створюючи рівномірне звукове поле без виражених акустичних тіней або фокусувань.
- Форма стелі. Стеля залу має пологу купольну форму, оздоблену живописом. На відміну від критично високих стель (18 м), тут висота є збалансованою, що дозволяє спрямовувати корисні відбиття у центр залу та на балкон із запізненням, яке не перевищує допустимі 35 мс.
- Співвідношення геометричних параметрів. Зал має прямокутну форму, яка плавно переходить у підкову в зоні глядацьких місць. Це забезпечує хорошу бічну підтримку звуку, що критично важливо для об’ємного звучання музичних інструментів.
- Матеріали оздоблення. Використання великої кількості деревини (паркет, дерев'яні крісла, панелі) та штукатурки на цегляній основі забезпечує збалансоване поглинання звуку на низьких і високих частотах. Це робить тембр голосу акторів «теплим» і природним.
- Задня стіна та яруси. Наявність бельетажу та балкона «розриває» задню стіну, запобігаючи виникненню зворотного відлуння (луни). Глибина підбалконного простору тут витримана в межах норми (не більше 1,5h), що гарантує розбірливість навіть на останніх рядах партеру.



Рисунок 1.7 - Запорізький академічний обласний український музично-драматичний театр імені В.Г. Магара

1.6.3. Зали театрів опери та балету

Таблиця 1.4- Порівняльний аналіз параметрів національних та світових театрів опери та балету

Театр	Місткість, осіб	Об'єм, $м^3$	Питомий об'єм, м3/особ.	Макс. відстань від сцени, м	Оцінка
Великий театр Рабата (Grand Théâtre de Rabat)	1800	14400	8,0	30	Відм.
Великий театр Касабланки (CasArts)	1800	15300	8,5	32	Відм.
Національний театр Мухаммеда V (Рабат)	1500	9000	6,0	28	Добре
Королівський театр Марракеша	1200	9600	8,0	35	Задов.
Театр «Ренесанс» (Рабат)	350	2100	6,0	15	Відм.
Ла Скала (Мілан)	2289	11250	4,9	22	Задов.
Одеський національний театр опери та балету	1728	9000	5,2	23	Задов.
Ковент-Гарден (Лондон)	2150	12250	5,7	25	Задов.
Національна Опера (Гарньє, Париж) 1875	2130	10000	4,7	25	Добре
Опера «Бастилія» (Париж) 1989	2700	21000	7,8	34	Незадов.

Театр	Місткість, осіб	Об'єм, $м^3$	Питомий об'єм, м3/особ.	Макс. відстань від сцени, м	Оцінка
Театр Колон (Буенос-Айрес) 1908	2487	20570	8,3	30	Відм.

Великий театр Рабата. Цей об’єкт є вершиною сучасної акустичної думки. Його внутрішній простір нагадує «кристалічну печеру», де кожна панель розрахована за допомогою комп'ютерного моделювання. Параметричні стіни та стеля працюють як єдиний дифузор. Складні вигини конструкції розсіюють звук, запобігаючи виникненню стоячих хвиль у залі з великим об'ємом (8,0 $м^3$/особ.). Використання інноваційних гіпсових панелей високої щільності, армованих скловолокном (GRG), що забезпечують необхідне відбиття звуку на низьких частотах.

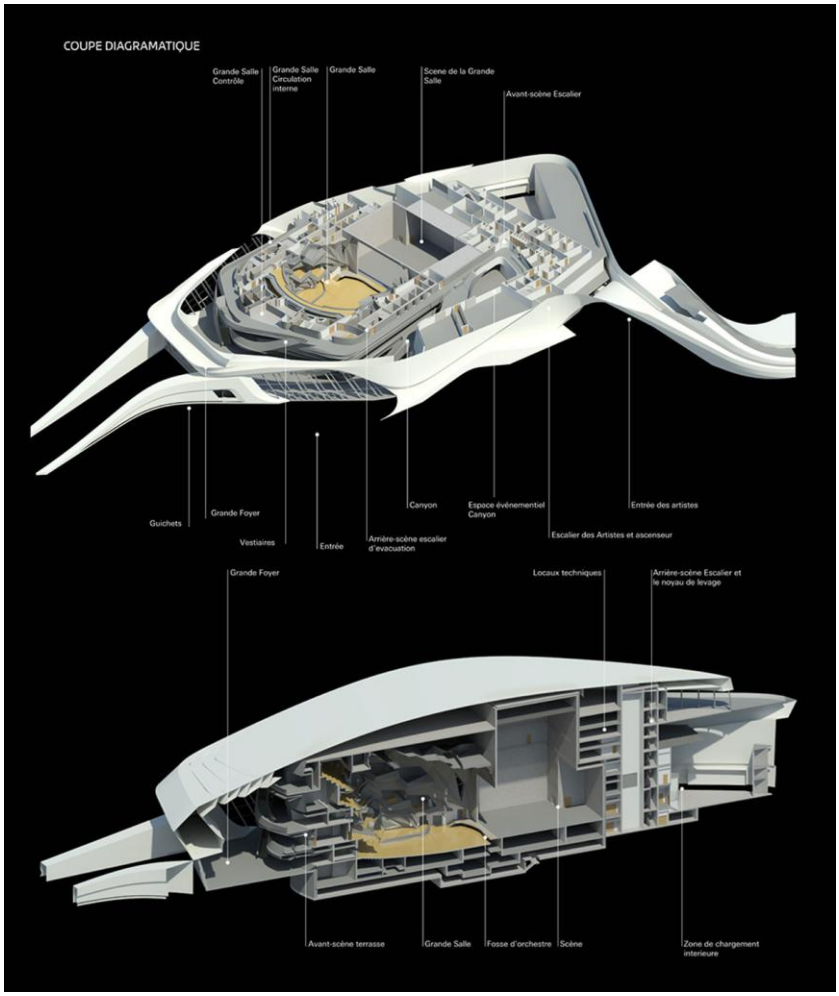


Рисунок 1.8 - Великий театр Рабата

Великий театр Касабланки (CasArts). Найбільший театральний комплекс в Африці. Зал спроєктовано як трансформер, що може адаптуватися під різні типи вистав. Питомий об'єм 8,5 $м^3$/особ. є дещо завищеним для драми, але ідеальним для великих оперних постановок та симфонічних концертів. Рухомі акустичні штори та відбивачі дозволяють коригувати час реверберації залежно від наповнення залу та жанру вистави.

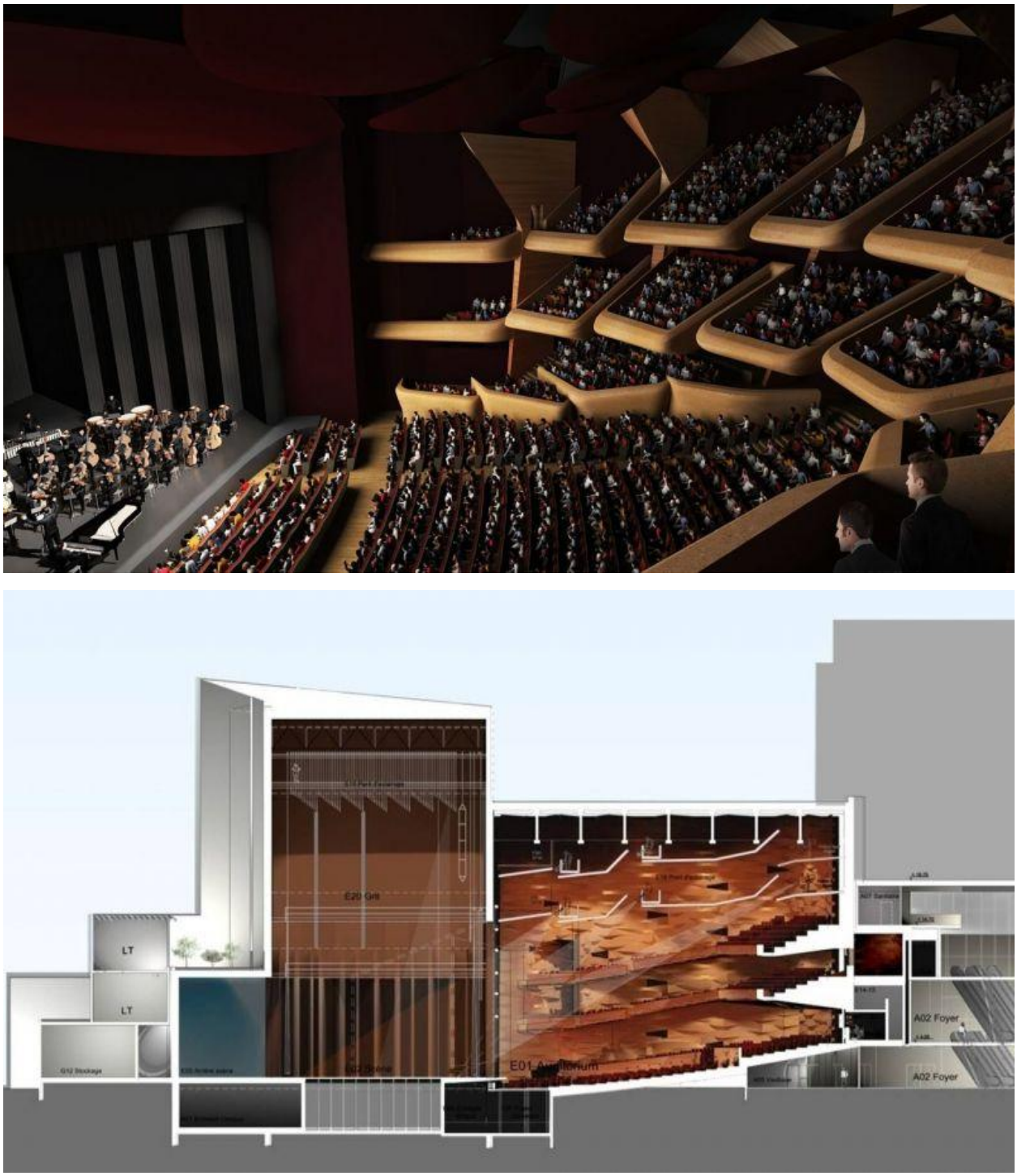


Рисунок 1.9 - CASARTS: Gran Teatro de Casablanca

Королівський театр Марракеша. Приклад складного об'єкта, де архітектурні амбіції (відкритий купол) спочатку створили проблеми для акустики.Через незавершеність купольної конструкції та надмірний об'єм виникали зони «акустичної тіні». Максимальне видалення від сцени (35 м) вимагає обов’язкового використання електронного звукопідсилення, що не є характерним для класичної опери.



Рисунок 1.10 - Royal Theatre of Marrakech

Славнозвісні театри Ла Скала у Мілані (рис. 1.11) та Національна опера в Парижі мають занижені об'єми (4,9 та 4,7 м^3/особ.). Час реверберації в цих залах на середніх частотах є однаковим — 1,25 с, тоді як оптимальне значення для оперних вистав становить 1,6 с.



Рисунок 1.11 - Театр Ла Скала в Мілані

Водночас новий оперний театр у Парижі „Бастілія“ більшістю публіки оцінюється як незадовільний з погляду акустики.



Рисунок 1.12 - Національна опера в Парижі

На загальну думку фахівців, найкращою акустикою володіє оперний театр Колон у Буенос-Айресі.

Театр Колон вдало поєднує класичну італійську форму «підкови» (яка забезпечує інтимність звуку) з величезним об'ємом повітря (який дає необхідну оперну реверберацію).

Стеля театру спроєктована таким чином, що вона працює як велетенська дека, рівномірно розподіляючи звук по всіх ярусах.

Використання м'яких меблів, килимів та особливих порід дерева дозволяє уникнути різких відбиттів, роблячи звук «оксамитовим».



Рисунок 1.13 - Театр Колон: Серце культурної спадщини Буенос-Айреса

1.6.4. Концертні зали

У великих концертних залах для симфонічної музики оптимальний питомий об'єм становить 8–10 м^3/особ., а для органної музики його бажано збільшити до 10–12 м^3/особ. Зазвичай максимальною межею місткості для таких залів прийнято вважати 2000 осіб.

Проте питомий об'єм, від якого безпосередньо залежить час реверберації, ще не повною мірою визначає акустичні якості залу. Величезне значення має структура відбиттів, а вона, своєю чергою, залежить від форми залу.

Таблиця 1.5 - Порівняльні техніко-акустичні параметри національних та світових концертних залів

Зал	Місткість, осіб	Об'єм, м$_3$	Питомий об'єм, м$_3$/особ.	T (500 Гц) виміряний, с	T (500 Гц) оптимальний, с
Роял Альберт-гол (Лондон), 1871	5220	86650	16,6	2,4	2,2
Барбікан-центр (Лондон), 1982	2026	17750	8,8	1,7	1,9
Музікферайн (Відень), 1870	1680	15000	8,9	2,0	1,9
Бостонський симфонічний зал, 1900	2625	18740	7,1	1,9	1,9
Карнегі-гол (Нью-Йорк), 1891	2800	24270	8,7	1,8	2,0
Національний палац «Україна»	3700	28000	7,5	1,8	1,9
Бетховен-галле (Бонн), 1959	1420	16000	11,2	1,8	1,9

Старі зали мають прямокутну форму, невелику ширину при відносно великій висоті, а також складний архітектурний рельєф: колони, напівколони, пілястри та ліпнину. За такої геометрії відбиття від стін приходять раніше, ніж від стелі, а напрямки відбитого звуку суттєво відрізняються від напрямку прямого звуку, що створює виражене просторове враження (ефект об'ємного звучання).

Цим пояснюються чудові акустичні якості таких залів, як Бостонський симфонічний зал, Карнегі-гол у Нью-Йорку (рис. 1.14) та театр Колон у Буенос-Айресі, попри те, що їхня місткість перевищує 2000 місць.



Рисунок 1.14 - Концертний зал Карнегі-гол (Нью-Йорк)

Практично всі закордонні зали, наведені в таблиці, мають хороші акустичні якості. Лише лондонський Роял Альберт-гол вирізняється підвищеною гулкістю.



Рисунок 1.15 - Національний палац мистецтв «Україна»

Національний палац мистецтв «Україна» це найбільша концертна зала країни. Вона демонструє перехід від класичних театральних схем до масштабних багатофункціональних залів радянського періоду, де головним завданням було охоплення величезної аудиторії.

Сучасна акустика залу значною мірою базується на електроакустичних системах (лінійні масиви), які компенсують недоліки природної реверберації.

При реконструкції 1996 року було оновлено крісла та настінні панелі, що дозволило краще контролювати час реверберації (T_{rt}).

На фоні «Бастілії» (Париж) з її 21 000 м^3, палац «Україна» виглядає більш збалансованим для поп-концертів та шоу, але програє спеціалізованим залам (як Театр ім. Магара) у чіткості драматичного діалогу.

1.7 Висновки до розділу 1

Таким чином, проаналізувавши інформацію про сучасний стан принципів проєктування звукоізоляції та акустичних рішень, було визначено необхідність розвитку більш економічних, енерго- та ресурсоощадних шляхів вирішення завдань під час капітального ремонту будівель із музичними залами.

Проблема перевитрати або нестачі звукоізоляції, а також непродуманий підхід до її облаштування призводять до нераціонального використання акустичних матеріалів та зменшення корисної площі приміщень.

Також під час капітального ремонту часто виникають помилки при проєктуванні акустичного середовища залу. Неекономічний підхід та використання застарілих технологій ставлять питання щодо доцільності модернізації цього процесу. На сьогодні необхідний більш комплексний метод реалізації капітального ремонту будівель із музичними залами. Цей метод має включати:

- перепланування функціональної схеми будівлі;
- правильне та раціональне використання звукоізоляційних

акустичних матеріалів;

- детальне опрацювання вузлів примикання між акустичними матеріалами та огороджувальними конструкціями;
- забезпечення акустичного середовища, яке має відповідати вимогам, що встановлюються конкретним призначенням залу.

.

РОЗДІЛ 2
МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗВУКОІЗОЛЯЦІЇ ТА ФОРМУВАННЯ АКУСТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАЛІВ

2.1. Загальна характеристика об'єкта дослідження та аналіз застосовуваних оздоблювальних матеріалів

Будівництво об'єкта, відповідно до проєктної документації, передбачає будівельне виробництво зі зведення двоповерхової будівлі будинку культури та підвального (цокольного) приміщення.

Будинок культури включає в себе такі приміщення: глядацька зала місткістю 150 місць, бібліотека з приміщенням для закритого фонду, читальна зала, сховище декорацій, гурткові, артистичні, перукарня, приміщення побутових послуг, танцювальна зала, фоє, вестибюль, гардероб, кабінет директора, санітарні вузли, душові, роздягальні, кімната прибирального інвентарю, коридори, тамбур.

Будівля оснащується системами інженерно-технічного забезпечення, зокрема системами електропостачання, теплопостачання, вентиляції, холодного та гарячого водопостачання, водовідведення, мережами зв’язку.

Основні техніко-економічні показники :

- Площа земельної ділянки: 2404,23 м^2
- Площа забудови: 982,27 м2
- Загальна площа будівлі: (рекомендується вказати згідно з експлікацією)
- Будівельний об'єм: 4986 м^3

Класифікація будівлі за нормами України:

- Клас наслідків (відповідальності): СС2 (згідно з ДСТУ 8855:2019, будівлі культурного призначення з такою місткістю належать до середніх наслідків).
- Ступінь вогнестійкості: II (відповідає вимогам для

багатофункціональних закладів культури).

- Клас конструктивної пожежної небезпеки: С0 (непоширення вогню по конструкціях).
- Клас функціональної пожежної небезпеки: Ф2.1 (будівлі видовищних та культурно-просвітницьких закладів).

Конструктивна характеристика будівлі:

- Фундаменти: Монолітні залізобетонні стрічкові по гравійно-піщаній підготовці (основа розраховується згідно з ДБН В.2.1-10:2018).
- Стіни: Несучі стіни із повнотілої керамічної цегли (товщиною 380–510 мм) з утепленням згідно з вимогами ДБН В.2.6-31:2021 щодо теплоізоляції.
- Стіни підвалу: Збірні бетонні блоки типу ФБС з гідроізоляцією.
- Перекриття: Збірні залізобетонні багатопустотні плити (серія 1.141-1 або аналоги).
- Покрівля: Скатна (кроквяна система) з покриттям металочерепицею. Передбачено вогнезахист дерев'яних конструкцій крокв.

Оздоблення та заповнення прорізів:

- Вікна: Металопластикові з енергозберігаючими двокамерними склопакетами.
- Двері: Зовнішні — алюмінієві утеплені; внутрішні — дерев’яні (МДФ) та протипожежні (ЕІ 30) на шляхах евакуації та в технічних приміщеннях.
- Підлоги: Керамічна плитка, лінолеум (у кабінетах), дощата підлога або спеціальне сценічне покриття (у глядацькій та танцювальній залах).
- Стелі: Підвісна система типу «Армстронг» з використанням акустичних плит.
- Теплоізоляція: Плити мінераловатні Izovat 150 для утеплення горищного перекриття та фасадів.

2.2. Способи проєктування ефективної звукоізоляції

2.2.1. Механізм проходження звуку через одношарову панель

З точки зору передачі звуку розрізняють акустично однорідні (одношарові) та акустично неоднорідні (багатошарові) конструкції.

Однорідні конструкції, про які йтиметься далі, складаються з одного або декількох шарів, жорстко пов'язаних між собою по всій поверхні, що коливаються як єдине ціле (наприклад, оштукатурені цегляні стіни, плити перекриттів із покриттям лінолеумом по стяжці тощо).

Багатошарові конструкції складаються з декількох шарів, не пов'язаних жорстко один з одним, які здатні коливатися з різними для кожного шару амплітудами. Звукоізоляційні властивості неоднорідних конструкцій є вищими, ніж однорідних.

Явище «хвильового збігу» в одношарових конструкціях.

Для одношарових конструкцій одним із чинників зниження звукоізоляції повітряного шуму є явище «хвильового збігу». При збудженні одношарової конструкції в будь-якій точці під дією джерела коливань, у ній поширюються згинальні хвилі, швидкість яких залежить від товщини, щільності, модуля пружності та частоти збуджувальних коливань.

У звуковій хвилі, що падає похило на конструкцію, почергові області підвищеного та зниженого звукового тиску викликають деформацію та згин конструкції.

Згідно з теорією самоузгодження хвильових полів, розробленою науковою школою проф. М. С. Сєдова, встановлено, що в усьому діапазоні частот проходження звуку через пластину обмежених розмірів пов'язане з явищем самоузгодження звукових полів із власним полем пластини. При цьому проходження звуку має двоїсту природу: резонансне та інерційне проходження звуку. З урахуванням двоїстої природи проходження звуку вираз звукової потужності, що випромінюється огороджувальною конструкцією,

запишеться як:

$$W_2=W_{2c}+W_{2i}, \quad (2.1)$$

де W_{2c} — потужність, що випромінюється пружними хвилями; W2i — потужність, що випромінюється інерційними хвилями.

У цьому випадку сумарний коефіцієнт проходження звуку через огородження:

$$\tau=\tau_c+\tau_i, \quad (2.2)$$

де τ_c — коефіцієнт резонансного проходження звуку, а τ_i — коефіцієнт інерційного проходження звуку через огородження. Власна звукоізоляція огородження, дБ:

$$R =10 \lg (1/ \tau_c + \tau_i), \quad (2.3)$$

Механізм проходження звуку через одношарову панель полягає в наступному: звукові хвилі, що падають з боку джерела шуму, утворюють у площині огородження поле звукового тиску, яке, своєю чергою, збуджує в пластині згинальні коливання. При цьому хвильове поле зміщень пластини формується вільними пружними та інерційними (чисто вимушеними) хвилями [15].

Поле інерційних хвиль утворене однорідною вимушеною хвилею та крайовими неоднорідними вимушеними хвилями. Поширення інерційних хвиль відбувається зі швидкістю сліду падаючої звукової хвилі й не залежить від пружних характеристик матеріалу, а визначається масою та розмірами огородження. Дані хвилі існують на кожній частоті, а на частотах власних коливань панелі власні та інерційні хвилі відрізняються початковою фазою руху [15].

Резонансне проходження звуку через панель визначається втратами енергії на розсіювання в матеріалі (що характеризуються коефіцієнтом втрат η) та ступенем самоузгодження власного хвильового поля зі звуковими полями перед та за огородженням (A_1 і A_2 — у «шумному» та «тихому» приміщеннях відповідно). Таким чином, випромінювання звуку в режимі власних коливань є різним в областях простих, неповних і повних просторових резонансів.

Для панелей із невеликою циліндричною жорсткістю може переважати інерційне проходження, і тоді звукоізоляція визначається поверхневою масою. Чим вища циліндрична жорсткість огородження, тим більший внесок у випромінювання звуку роблять резонансні коливання. У цьому випадку на величину звукоізоляції, крім маси, впливають товщина пластини, модуль пружності та коефіцієнт втрат матеріалу.

Підвищити власну звукоізоляцію огородження можна шляхом зменшення циліндричної жорсткості D або збільшенням коефіцієнта втрат. Своєю чергою, циліндрична жорсткість пластини визначається за формулою:

$$D = Eh^3/(12(1-\mu)), \qquad (2.4)$$

де:

- E — модуль пружності матеріалу (модуль Юнга) пластини, Па;
- h — товщина пластини, м;
- μ — коефіцієнт Пуассона матеріалу пластини.

У момент, коли швидкість поширення вимушеної хвилі в пластині збігається зі швидкістю вільної згинальної хвилі, настає своєрідний резонанс, який дістав назву ефекту хвильового збігу.

Хвильовий збіг — це явище, коли точно збігаються фазові швидкості поширення вільних згинальних хвиль у пластині та фазові швидкості поширення падаючих звукових хвиль уздовж пластини.

При цьому інтенсивність згинальних коливань різко збільшується і, як наслідок, різко зростає проходження звуку через огородження в ізольоване приміщення. Теоретично має місце повне проходження звуку через огородження.

Таким чином стає зрозуміло, що в певному діапазоні частот, як встановив Л. Беранек, наприклад:

- у зоні I проходження звуку через пластину залежить від згинальної жорсткості. Чим вона вища, тим нижчий коефіцієнт звукопроникності конструкції. Крім того, у цій області значний вплив мають резонанси пластини;
- у зоні II звукоізоляція огородження визначається лише його масою;
- у зоні III — хвильовим збігом і жорсткістю пластини.

2.2.2. Шляхи підвищення звукоізоляційної здатності огороджувальних конструкцій

Для одношарових масивних огороджень існує залежність: чим воно масивніше, тим краще воно ізолює приміщення від шуму. Згідно з дослідженнями, подвоєння маси конструкції призводить до поліпшення звукоізоляції в середньому на 6 дБ.

Однак вимога раціональної витрати ресурсів диктує необхідність розвитку сучасного проєктування звукоізоляції в напрямі забезпечення необхідних акустичних умов у приміщеннях за рахунок регульованої звукоізоляції огороджень при мінімально можливій їхній масі.

Поліпшення звукоізоляції перегородки можна досягти, зменшивши жорсткість вузла спряження каркаса перегородки з несним перекриттям та елементів перегородок один з одним. Для цього під час монтажу перегородок між поверхнею основи та горизонтальними напрямними встановлюють ущільнювальні стрічки та еластичні прокладки. Аналогічно ущільнювальні прокладки влаштовують у вузлі примикання перегородки до стелі.

Влаштування обшивки з двох рядів ГКП (гіпсокартонних плит) по обидва боки дерев’яних стійок, що дозволяє збільшити поверхневу щільність конструкції, призводить до поліпшення звукоізоляції на 8–9 дБ. Заміна дерев’яного каркаса на одинарний металевий дозволяє підвищити звукоізоляцію на 3–5 дБ при 20-відсотковому зниженні маси перегородки.

Гарну звукоізоляцію можуть забезпечити перегородки на металевому каркасі з двошаровою обшивкою, у яких індекс ізоляції повітряного шуму на 6 дБ більший порівняно з одношаровою.

Наявність жорсткого каркаса створює умови для безперешкодної передачі звуку через його конструкцію від однієї обшивки до іншої. Тому заміна одинарного каркаса на подвійний, що складається з двох рядів стійок, не пов'язаних між собою, дозволяє значно поліпшити звукоізоляційні характеристики.

Поліпшення звукоізоляції додатковим шаром, таким як пружно закріплене облицювання стін, «плаваюча підлога» або підвісна стеля, є різним для непрямої та прямої звукопередачі й залежить від типу базових структурних елементів (несних конструкцій), на які встановлюється цей шар. Тому звукоізоляція має визначатися за результатами лабораторних вимірювань із таким самим базовим структурним елементом, який застосовується в натурних умовах.

На даний час не існує універсального спрощеного методу розрахунків, який би дозволяв точно визначити вплив непрямої звукопередачі на пряму, а також результатів, зумовлених зміною базового структурного елемента без проведення детальних випробувань.

Однак, за результатами випробувань різних технічних рішень, що дозволяють поліпшити звукоізоляцію конструкцій, накопичується статистика, яка дозволяє використовувати їх у процесі проєктування. Деякі типові приклади поліпшення звукоізоляції додатковими шарами або за допомогою спеціальних заходів наведені в таблиці 2 згідно з ДСТУ EN 12354-1:2010[9], ДБН В.1.1-31:2013 та каталогами сертифікованих виробників.

2.2.3. Аналіз та нормування показників звукоізоляції елементів огородження

Згідно з ДСТУ-Н Б В.1.1-33:2013 «Настанова з розрахунку і проєктування звукоізоляції огороджувальних конструкцій житлових і громадських будівель» (аналог СП 23-103-2003) [2], при орієнтовних розрахунках індекс ізоляції повітряного шуму огороджувальними конструкціями суцільного перерізу допускається визначати за формулою:

$$R=37\lg m+55\lg K-43, \quad (2.5)$$

де:

- m — поверхнева щільність, кг/м^2;
- K — коефіцієнт, що враховує відносне збільшення згинальної жорсткості огородження з бетонів на легких заповнювачах, поризованих бетонів тощо відносно конструкцій із важкого бетону з тією ж поверхневою щільністю.

В Україні діє національний стандарт ДСТУ EN 12354-1:2010 «Акустика будівельна. Оцінювання акустичних характеристик будівель за характеристиками елементів. Частина 1. Ізоляція повітряного шуму між приміщеннями» [8]. У ДСТУ EN 12354-1:2010 наводиться наступна формула для розрахунку звукоізоляції огороджувальних конструкцій згідно з ДСТУ EN ISO 717-1 «Акустика. Оцінювання звукоізоляції в будівлях та будівельних елементах. Частина 1. Ізоляція повітряного шуму»:

$$R_w=37{,}5\lg(m/m_0)-42, \quad (2.6)$$

Для m<150 кг/м^2 застосовується корекція C=−1 дБ,

Для m>150 кг/м^2 застосовується корекція C=−2 дБ.

Порівняння результатів вимірювань, представлених різними міжнародними лабораторіями за останні тридцять років, показує, що вони

лежать у межах відхилень від мінус 4 до плюс 8 дБ. Такий відносно великий розкид зумовлений багатьма факторами, деякі з яких пов'язані з особливостями матеріалу, інші — з лабораторним обладнанням та застосуванням різних методів вимірювань. Урахування впливу зазначених факторів призвело до розроблення різних емпіричних формул для «закону маси», що використовуються в даний час у європейських країнах.

2.3. Архітектурна акустика: фундаментальні принципи проєктування залів

У закритому приміщенні після припинення дії джерела звуку слухач сприймає музичний або мовленнєвий сигнал, що пролунав, протягом певного часового інтервалу. Це пояснюється тим, що рівень звукового тиску (РЗТ), створений у розрахунковій точці, є інтегральною характеристикою енергії прямого звуку та енергії відбитих від поверхонь приміщення звукових хвиль.

Процес спаду звукової енергії називається реверберaційним процесом, а саме явище — реверберацією.

Для кількісної оцінки реверберації використовується поняття час реверберації, який не повинен залежати ні від індивідуального порогу чутності, ні від початкового рівня сигналу. Це час, за який початкова енергія сигналу зменшується на 60 дБ.

Належний час реверберації, що характеризує загальну гулкість приміщення, є однією з важливих умов хорошої акустики залу. При цьому слід пам'ятати, що для досягнення чітко визначеного часу реверберації потрібна достатня дифузність звуку в залі.

Час реверберації є першою та однією з основних характеристик приміщень, що залежить від об'єму приміщення та загального звукопоглинання. Об'єм зали визначається її пропорціями.

Оптимальне відношення довжини зали L до її середньої ширини B становить:

$$1,3<L/B<1,6, \quad (2.7)$$

У таких самих межах має бути й відношення ширини зали до її середньої висоти H — від 1,3 до 1,6.

Рекомендований у плані кут розкриття трапеції бічних стін зали становить від 5° до 12°. Прямокутна форма з горизонтальною стелею є допустимою лише для лекційних залів місткістю не більше 200 осіб.

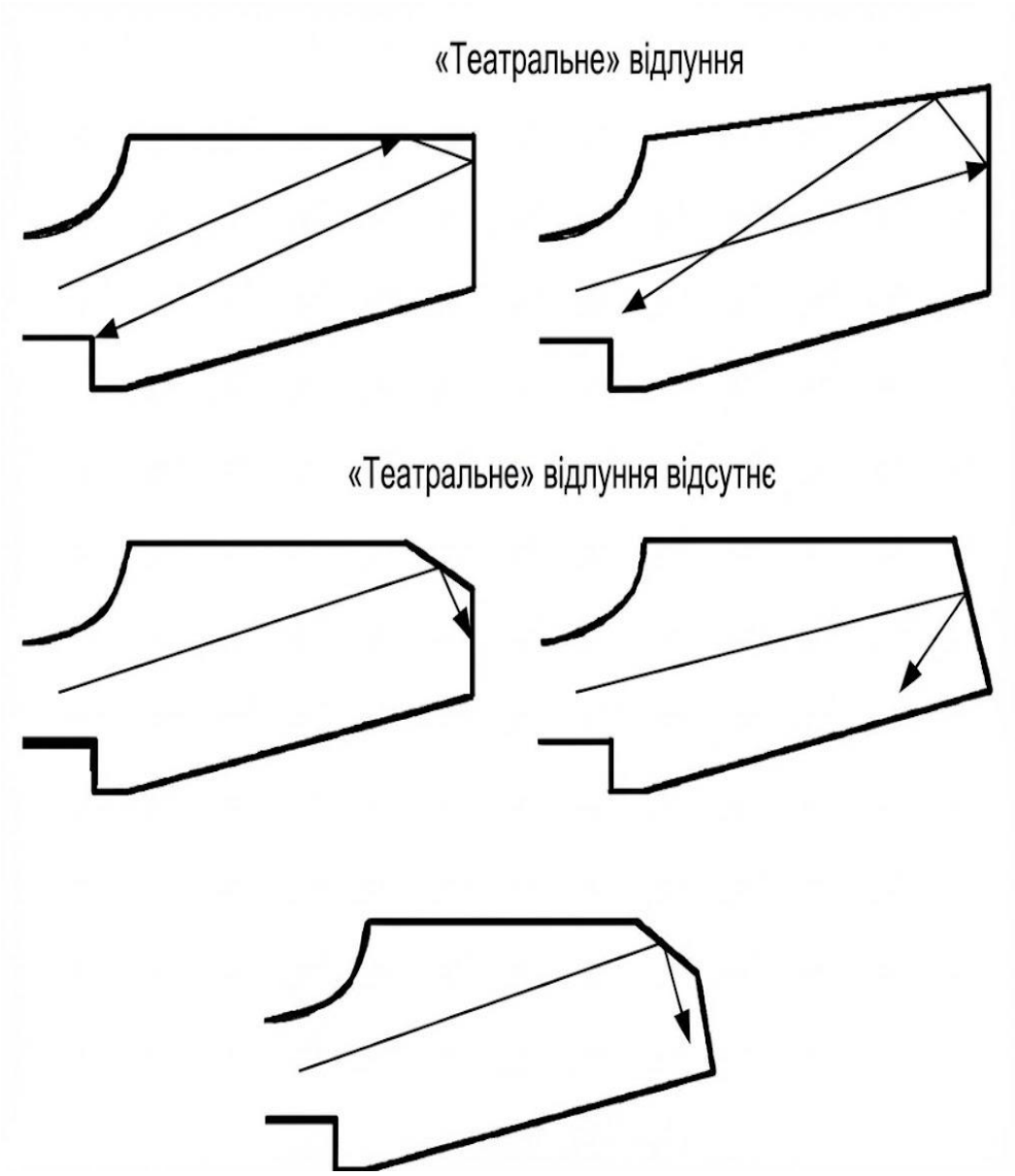


Рисунок 2.1 — Театральне відлуння

У розрахунку акустичних параметрів обчислюються такі показники, як:

- Час запізнення перших відбиттів.

- Допустимий час запізнення.
- Радіус дії прямого звуку.Театральне відлуння (рис. 2.1)

Наявність і сила відлуння також залежить від щільності та розрідженості повітря і багатьох інших чинників — відстані від джерела звуку до поверхні, що відбиває звук, кута цієї поверхні стосовно звукових хвиль, а також інтервалу між прямою та відбитою хвилями.

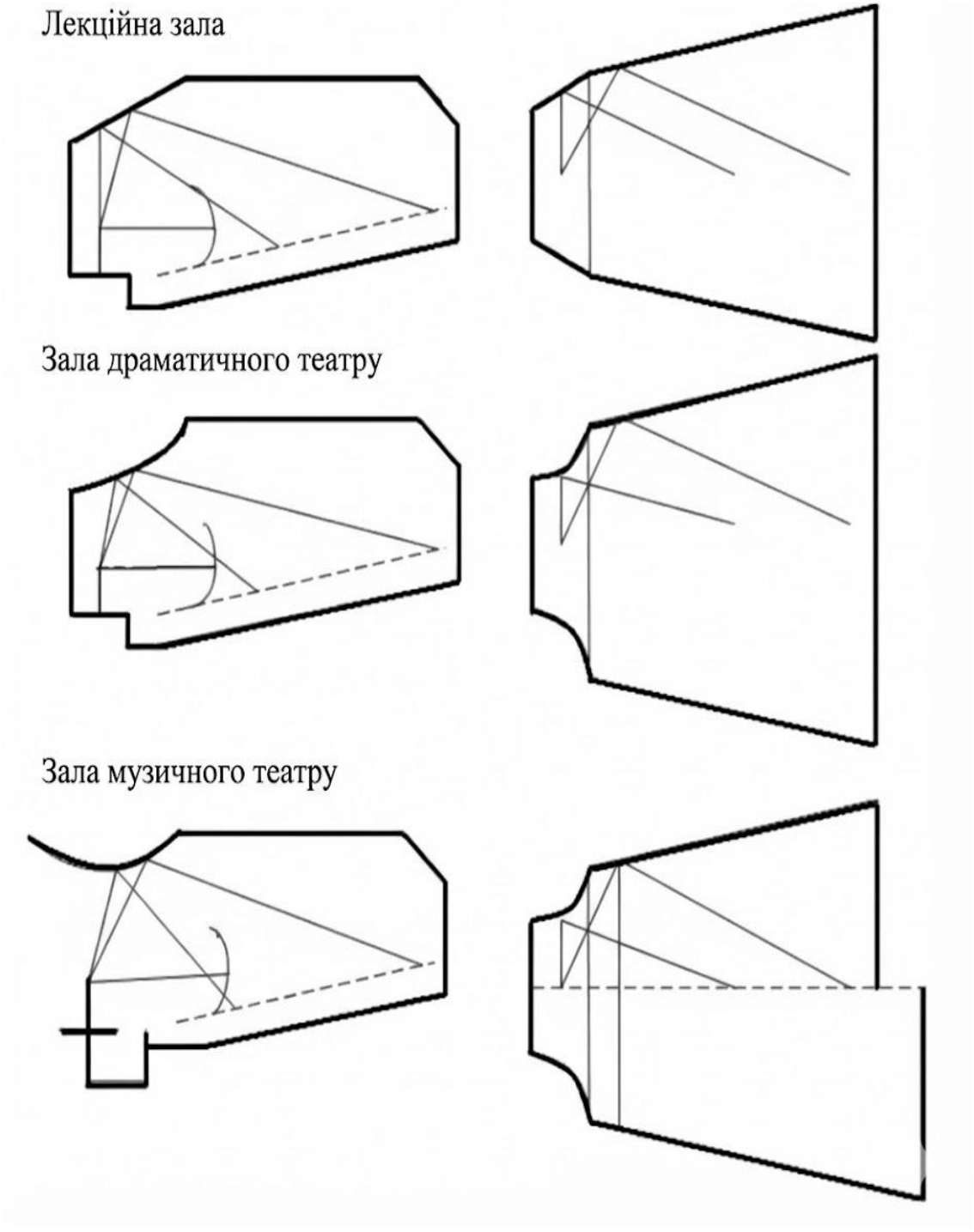


Рисунок 2.2 - Перші відбиття від стелі, стін та відбивачів

2.4. Фізико-математична модель процесу поширення звуку

Хвиля — зміна стану середовища (збурення), що поширюється в цьому середовищі і переносить із собою енергію. Інакше кажучи: «хвилями або хвилею називають просторове чергування максимумів і мінімумів будь-якої фізичної величини, що змінюється з часом, наприклад, густини речовини, напруженості електричного поля, температури».

Незалежно від природи хвилі перенесення енергії здійснюється без перенесення речовини; останнє може виникнути лише як побічний ефект. Перенесення енергії — принципова відмінність хвиль від коливань, у яких відбуваються, так би мовити, лише «місцеві» перетворення енергії. Хвилі ж, як правило, здатні віддалятися на значні відстані від місця свого виникнення.

Тобто друга похідна зміщення за часом пропорційна другій похідній зміщення за координатою, причому коефіцієнтом пропорційності служить квадрат швидкості поширення хвилі V.

Отримане диференціальне рівняння в найбільш загальному вигляді описує поширення хвильового процесу; воно має назву хвильового рівняння.

$$\frac{1}{\rho_o c^2}\frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} + \nabla \cdot \left(-\frac{1}{\rho_o}\nabla \rho\right) = 0, \qquad (2,8)$$

де:

p_0 — тиск, за якого ми чуємо звук (2·10−5 Па);

p — тиск, Па;

t — час, с.

Плоска хвиля вирізняється тією властивістю, що напрямок її поширення та її амплітуда однакові в усьому просторі. Довільні звукові хвилі цієї властивості, звісно, не мають. Однак можливі випадки, коли звукову хвилю, що не є плоскою, у кожній невеликій ділянці простору можна розглядати як плоску. Для цього необхідно, щоб амплітуда і напрямок хвилі майже не змінювалися протягом відстаней порядку довжини хвилі.

Якщо ця умова виконана, то можна ввести поняття про промені як про

лінії, дотичні до яких у кожній точці збігаються з напрямком поширення хвилі, і можна говорити про поширення звуку вздовж променів, відволікаючись при цьому від його хвильової природи. Вивчення законів поширення звуку в таких випадках становить предмет геометричної акустики. У даному випадку процес поширення звукових хвиль описується такою системою рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{\vec{dq}}{dt} = \frac{\vec{\partial\omega}}{\partial k} \\ \frac{\vec{dk}}{dt} = \frac{\vec{\partial\omega}}{\partial q}, \end{cases} \tag{2.9}$$

де:

- k — хвильовий вектор, $м^{-1}$;
- ω (часто) — частота, $с^{-1}$;
- t — час, с;
- q — вектор, м.

2.5. Програмне забезпечення COMSOL Multiphysics

COMSOL Multiphysics — це універсальна програмна платформа для моделювання прикладних завдань. У ній можна використовувати базову платформу окремо або розширювати її функціональні можливості, комбінуючи та додаючи модулі розширення, які дозволяють моделювати електромагнітні, механічні, акустичні, гідродинамічні, термодинамічні та хімічні пристрої та процеси.

Використовувані чисельні методи та доступні типи досліджень

Програмний пакет COMSOL використовує для розрахунків гнучкі та ефективні розв’язувачі (решателі) та методи. Частоти, характерні для задач акустики, охоплюють кілька декад. Обчислювальна складність розрахунків може суттєво залежати від формулювання акустичної задачі. Таким чином, жоден конкретний спосіб чи чисельний метод не підходить абсолютно для всіх

задач із цієї галузі.

Модуль «Акустика» містить чотири різні чисельні методи:

- Метод скінченних елементів (FEM);
- Метод граничних елементів (BEM);
- Метод трасування променів (Raytracing);
- Розривний метод скінченних елементів Гальоркіна (dG-FEM).

Різні типи досліджень доповнюють набір чисельних методів і дозволяють виконувати всі потрібні види аналізу. Зокрема, до модуля включено:

1. Дослідження в частотній області (frequency domain).
2. Дослідження на власні частоти та моди (eigenfrequency та eigenmodes).
3. Нестаціонарні дослідження в часовій області (time domain).

Спеціалізовані ітераційні методи дозволяють розв’язувати мультифізичні моделі з мільйонами ступенів вільності, поєднуючи різні підходи в межах однієї задачі.

Це програмний пакет для моделювання акустичних явищ у пристроях і конструкціях.

За допомогою моделювання можна досліджувати і покращувати якість звуку і знижувати рівень шуму для різних пристроїв і конструкцій, заснованих на акустичних явищах і ефектах. Модуль Акустика розширює можливості пакета COMSOL Multiphysics і надає набір інструментів для моделювання акустичних хвиль і вібрацій у гучномовцях, мобільних пристроях, мікрофонах, звукопоглинальних пристроях, датчиках, сонарах і витратомірах. Ви можете використовувати спеціалізовані функції для візуалізації акустичних полів і побудови віртуальних прототипів пристроїв і компонентів.

Модуль Акустика також включає безліч спеціалізованих формулювань і матеріальних моделей, які можна використовувати для вузькоспеціалізованих прикладних задач, наприклад, для розрахунку термічних і в'язких втрат (т.зв. термов'язка акустика) у мініатюрних перетворювачах і мобільних пристроях або для розрахунку поропружних хвиль і коливань на основі рівнянь Біо.

Мультифізичний функціонал додатково розширюється за рахунок використання декількох спеціалізованих чисельних методів, включаючи:

- Метод скінченних елементів (МСЕ — FEM);
- Метод граничних елементів (МГЕ — BEM);
- Трасування променів (RayTracing);
- Розривний метод скінченних елементів Гальоркіна (dG-FEM).

Універсальний та ефективний розрахунок траєкторій променів. Модуль Ray Optics (Геометрична оптика) дозволяє моделювати поширення електромагнітних хвиль у системах, у яких довжина хвилі значно коротша за найменший геометричний елемент моделі. Електромагнітні хвилі розглядаються як промені, що проникають крізь однорідні та диференційовані середовища. Траєкторії таких променів можуть розраховуватися на великих відстанях при мінімальних витратах на обчислення, оскільки відсутня необхідність виражати довжину хвилі за допомогою сітки скінченних елементів. На межах середовищ промені можуть зазнавати відбиття та рефракції.

У модулі Ray Optics доступний ряд граничних умов, включаючи поєднання дзеркального та розсіяного відбиття. Промені можуть брати початок в областях, на межах або на регулярній сітці точок. Особливі функції доступні для моделювання сонячного випромінювання, а також променів, відбитих від освітленої поверхні або заломлених нею. Спеціалізовані інструменти постобробки забезпечують безліч способів аналізу траєкторій променів, оцінки представлення сукупності променів і навіть візуалізації інтерферограми.

Незалежно від того, чи використовуємо ми лише модуль «Акустика», чи поєднання різних продуктів сімейства COMSOL, процес моделювання у програмному пакеті COMSOL завжди універсальний, логічний і простий.

Типовий процес моделювання складається з кількох кроків:

- Побудова геометрії;
- Вибір матеріалів;

- Вибір відповідного фізичного інтерфейсу;
- Задання граничних і початкових умов;
- Створення скінченно-елементної сітки, у т. ч. автоматичне;
- Розрахунок фізичної моделі;
- Візуалізація результатів;
- Інтеграція з іншими програмними платформами.

Якщо ми хочемо використовувати в моделі табличні дані або включити в модель складну геометрію зі сторонньої CAD-системи, то для нас знайдеться відповідний модуль інтеграції. За допомогою продуктів LiveLink™ ми можемо інтегрувати програмний пакет COMSOL Multiphysics із багатьма сторонніми інструментами, наприклад, програмним пакетом MATLAB, електронними таблицями Microsoft Excel, пакетом Inventor та багатьма іншими.

2.6 Висновки до розділу 2

Підсумовуючи, можна сказати, що немає розробленого інженерного підходу щодо методики розрахунку акустики та звукоізоляції музичних залів при капітальному ремонті, будівництві та реконструкції.

По-перше, потрібно оцінити геометричні параметри та визначити правильні шляхи при виборі об’єму залу та габаритів конструкцій. Зробити це максимально адаптивно для різних будівель, що мають різну потужність відвідуваності (місткість) та специфіку роботи.

По-друге, необхідно побудувати геометричну модель поширення звукових хвиль у приміщенні для визначення найбільш вигідних положень для встановлення відбивачів звуку. Визначити положення сцени та глядацьких місць у плані та за висотою. Виявити основні закономірності, які можна застосовувати у проєктах подібних приміщень музичних залів.

По-третє, для досягнення проєктування ефективної звукоізоляції необхідно здійснити розрахунок варіантів огороджувальних конструкцій

різних типів і матеріалів з точки зору економії коштів.

.

РОЗДІЛ 3
АНАЛІТИЧНА РОБОТА ТА РОЗРАХУНКОВЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ НАЙБІЛЬШ ЕФЕКТИВНОГО ВАРІАНТА ПРОЄКТУ

3.1. Розрахунки звукоізоляції перегородок

Розрахунок проводиться згідно з ДБН В.1.1-31:2013 «Захист територій, будинків і споруд від шуму» та ДСТУ-Н Б В.1.1-33:2013 «Настанова з розрахунку та проектування захисту від шуму».[7]

Розрахунком передбачається комплекс заходів, що забезпечують виконання таких нормативних вимог щодо захисту від шуму: Таблиця 3 — «Нормативні показники ізоляції повітряного шуму огороджувальними конструкціями та приведені рівні ударного шуму перекриттів» (згідно з ДБН В.1.1-31:2013) у частині, що стосується закладів освіти.

Таблиця 3.1 — Необхідні нормативні індекси ізоляції повітряного шуму

Найменування та розташування огороджувальної конструкції	$R_w^{\text{вим}}$ дБ
п. 11. Стіни та перегородки між навчальними кабінетами, класами та аудиторіями, а також ті, що відокремлюють ці приміщення від приміщень загального користування.	48
п. 12. Стіни та перегородки між музичними класами закладів загальної середньої освіти та ті, що відокремлюють ці приміщення від приміщень загального користування.	55

3.1.1. Розрахунок за варіантом А

Розрахунок звукоізоляції перегородки зі стінових бетонних блоків КП-ПС-39-150-1500 (згідно з ДСТУ Б В.2.7-7:2008 або ГОСТ 6133-99) товщиною 90 мм із шаром штукатурки.

Проведемо розрахунок ізоляції повітряного шуму конструкції перегородки зі стінових бетонних блоків із густиною матеріалу 2300кг/м^3 та пустотністю 20%. Товщина перегородки становить 110мм з урахуванням цементної штукатурки по 10мм з кожного боку. Середня густина матеріалу з урахуванням пустотності — 1840кг/м^3.

1. Визначення частоти, що відповідає точці В.

Згідно з методикою ДСТУ-Н Б В.1.1-33:2013[7], знаходимо частоту для точки В:

$$f_B = 29000 / h = 29000 / 110 \approx 263.6 \text{ Гц}, \quad (3.1)$$

Примітка: У вашому тексті було вказано 2636 Гц, проте при h=110 результат ділення становить 263.6. Для важких бетонних блоків точка В зазвичай лежить у межах середніх частот. Округляємо до середньогеометричної частоти найближчої 1/3-октавної смуги — 250 Гц.

2. Визначення поверхневої густини.

Поверхнева густина огорожі визначається як $m=\sum\rho_i h_i$. У нашому випадку:

$m=1840\cdot0.09+1800\cdot0.02=201.6$ кг/м^2

де 1800 кг/м^3 — густина штукатурного розчину, 0.02 м — сумарна товщина шарів штукатурки.

3. Визначення еквівалентної поверхневої густини/

Еквівалентна поверхнева густина розраховується за формулою:

$$m_e = K\cdot m, \quad (3.2)$$

де K — коефіцієнт, що враховує відносне збільшення згинної жорсткості огорожі з легких або пустотілих бетонів стосовно конструкцій із важкого бетону тієї ж маси. Згідно з таблицею 10 (аналог у ДСТУ), для бетонних блоків із пустотністю 20% приймаємо K=1.1.

$$m_e = 201.6 \text{ кг/м}^2 \cdot 1.1 = 221.76 \text{ кг/м}^2$$

4. Визначення ординати точки В/

Ордината точки В визначається за формулою:

$$R_B = 20 \lg m_e - 12, \quad (3.3)$$

$$R_B = 20 \lg(221.76) - 12 \approx 20 \cdot 2.346 - 12 \approx 35 \text{дБ}$$

5. Побудова частотної характеристики/

Для побудови розрахункової частотної характеристики ізоляції повітряного шуму:

- Від точки В вліво проводимо горизонтальний відрізок ВА.
- Вправо від точки В проводимо відрізок ВС з нахилом 6 дБ на октаву до точки С з ординатою 65 дБ.
- Точка С відповідає частоті 5000Гц.

Розрахована частотна характеристика ізоляції повітряного шуму для розглянутої конструкції перегородки наведена на рисунку 3.1.

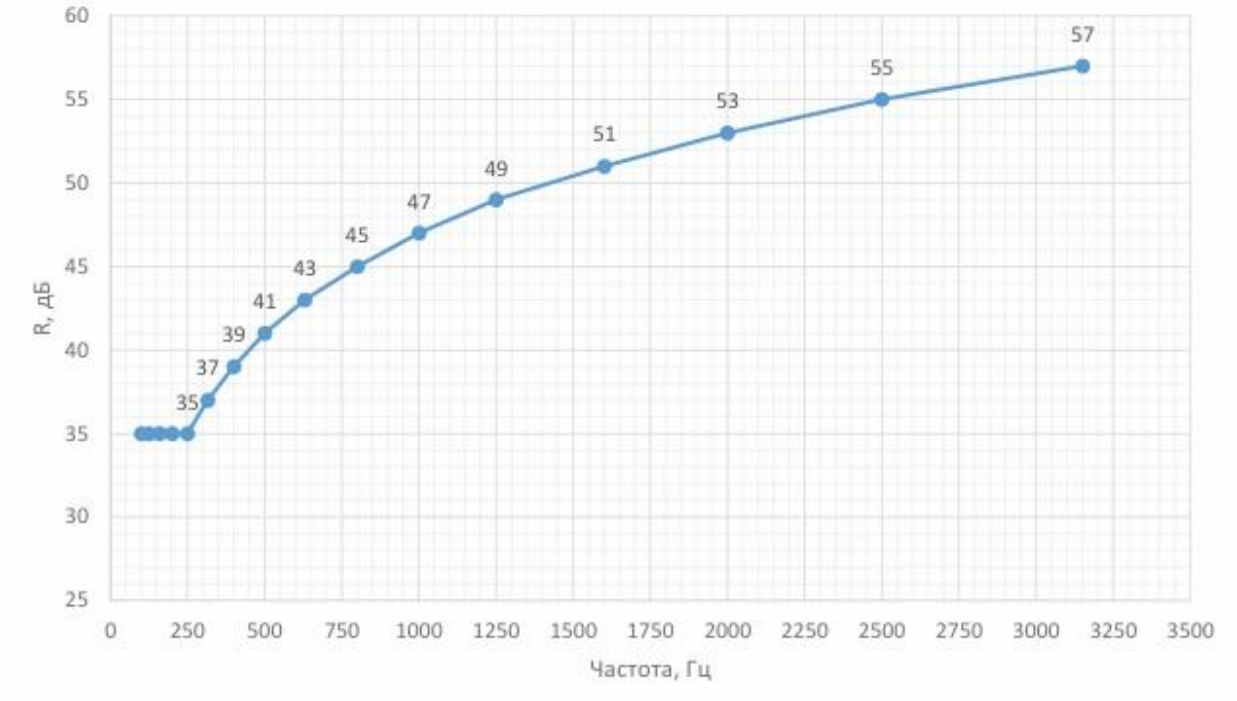


Рисунок 3.1 — Розрахункова частотна характеристика ізоляції повітряного шуму перегородки (Варіант А)

У нормованому діапазоні частот ізоляція повітряного шуму вихідною перегородкою має значення, наведені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 — Ізоляція повітряного шуму перегородки (Варіант А)

f, Гц	100	125	160	200	250	315	400	500
R, дБ	35	35	35	35	35	37	39	41
f, Гц	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150
R, дБ	43	45	47	49	51	53	55	57

Визначимо індекс ізоляції повітряного шуму R_w перегородки зі стінових бетонних блоків, поштукатуреної з обох боків, розрахункова частотна характеристика якої наведена в таблиці 3.1. Розрахунок проводиться за формою таблиці 3.3. Вносимо в таблицю значення R оцінної кривої та знаходимо несприятливі відхилення розрахункової частотної характеристики від оцінної кривої.

Таблиця 3.3 — Розрахунок несприятливих відхилень розрахункової частотної характеристики від оцінної кривої

№	Середньогеометрична частота третинооктавної смуги, Гц															
	100	125	160	200	250	315	400	**500**	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150
1	35	35	35	35	35	37	39	**41**	43	45	47	49	51	53	55	57
2	33	36	39	42	45	48	51	**52**	53	54	55	56	56	56	56	56
3	-	1	4	7	10	11	12	**11**	10	9	8	7	5	3	1	-
4	27	30	33	36	39	42	45	**46**	47	48	49	50	50	50	50	50
5	-	-	-	1	4	5	6	**5**	4	3	2	1	-	-	-	-
6								**46**								

Перелік пунктів для розрахункової таблиці:

1. Розрахункова частотна характеристика R, дБ

2. Оцінна крива, дБ. Набір оцінних значень, що використовуються для порівняння з результатами вимірювань (або розрахунків) у

третинооктавній смузі, наведений у таблиці 1 ДСТУ EN ISO 717-1:2022 «Акустика. Оцінка звукоізоляції в будинках та огороджувальних конструкцій. Частина 1. Ізоляція повітряного шуму».

3. Несприятливі відхилення, дБ

4. Оцінна крива, зміщена вниз на 2 дБ (або інше ціле значення відповідно до методу зміщення).

5. Несприятливі відхилення від зміщеної оцінної кривої, дБ

6. Індекс ізоляції повітряного шуму R_w, дБ

Якщо сума несприятливих відхилень наближається до 32 дБ, але не перевищує цю величину, значення індексу R_w відповідає значенню оцінної кривої на частоті 500 Гц. Якщо сума несприятливих відхилень перевищує 32 дБ, оцінна крива зміщується вниз на ціле число децибел так, щоб сума несприятливих відхилень не перевищувала зазначену величину.

Якщо сума несприятливих відхилень значно менша за 32 дБ або несприятливі відхилення відсутні, оцінна крива зміщується вгору на ціле число децибел так, щоб сума несприятливих відхилень від зміщеної оцінної кривої максимально наближалася до 32 дБ, але не перевищувала її.

У нашому випадку початкова сума несприятливих відхилень становить 99 дБ, що значно вище за 32 дБ. Зміщуємо оцінну криву вниз (коригуємо до отримання допустимої суми) і знаходимо суму несприятливих відхилень уже від зміщеної оцінної кривої. Після зміщення на 4 дБ вона становить 31 дБ, що менше за 32 дБ.

За значення індексу ізоляції повітряного шуму приймаємо значення зміщеної оцінної кривої в третинооктавній смузі 500 Гц, тобто:

R_w=46дБ

Це значення НЕ ВІДПОВІДАЄ вимогам ДБН В.1.1-31:2013 «Захист територій, будинків і споруд від шуму» (згідно з Таблицею 3, мінімальна вимога для стін між класами — 48 дБ, для музичних залів — 55 дБ). Необхідне додаткове влаштування звукоізоляційного матеріалу.

Звукоізоляційні характеристики подібних конструкцій визначаються

переважно їхньою масою, але навіть при збільшенні товщини вдвічі індекс звукоізоляції зростає лише на 5–8 дБ. У такому разі є два шляхи вирішення:

1. Збільшення товщини перегородки, якщо втрата корисної площі не є критичною.

2. Застосування багатошарової конструкції.

Для цього варіанта перегородки використовуємо додаткове облицювання гіпсокартонними плитами (ДСТУ EN 520) товщиною 12,5 мм для підвищення звукоізоляції. При різному виконанні монтажу, якості опрацювання стиків та з'єднань значення додаткової звукоізоляції залишається в межах від 2 до 8 дБ.

Таким чином, загальний індекс звукоізоляції перегородки за найгіршого варіанта виконання становить:

46+2=48 дБ

Що ВІДПОВІДАЄ мінімальним вимогам ДБН В.1.1-31:2013 для звичайних навчальних кабінетів, проте є недостатнім для музичних залів.

3.1.2. Розрахунок за варіантом Б

Розрахунок проводиться для перегородок із важкого бетону (згідно з ДСТУ Б В.2.7-43:2011).

Проведемо розрахунок ізоляції повітряного шуму конструкції перегородки з важкого бетону густиною 2400 кг/м^3 із поверхневою густиною 400 кг/м^2. Товщина перегородки становить 160 мм.

1. Визначення частоти, що відповідає точці В.

Для суцільних огороджувальних конструкцій із важкого бетону частота точки В визначається за формулою:

$$f_B = C /h, \quad (3.4)$$

Де С — коефіцієнт для важкого бетону (згідно з ДСТУ, для бетону

густиною >1800 кг/м^3 приймається 20000):

$$f_B = 16020000 = 125 Гц$$

Округляємо до середньогеометричної частоти третиноктавної смуги, у межах якої знаходиться f_B. Значення 125 Гц є стандартною середньогеометричною частотою.

2. Визначення еквівалентної поверхневої густини/

Еквівалентна поверхнева густина визначається за формулою:

$$m_e = K \cdot m, \quad (3.5)$$

де K — коефіцієнт, що враховує відносне збільшення згинної жорсткості огорожі. Згідно з таблицею 10 ДСТУ-Н Б В.1.1-33:2013, для суцільних конструкцій густиною понад 1800 кг/м^3:

K=1

Отже:

$$m_e = 400 \cdot 1 = 400 \text{ кг/м}^2$$

3. Визначення ординати точки В/

Підставляємо значення у формулу, результат округлюємо до 0,5 дБ:

$$R_B = 20\lg(m_e) - 12$$

$$R_B = 20\lg(400) - 12 = 20 \cdot 2{,}602 - 12 = 52{,}04 - 12 = 40{,}04 \approx 40 \text{ дБ}$$

4. Побудова частотної характеристики

Для побудови розрахункової характеристики:

- Від точки В вліво проводимо горизонтальний відрізок ВА (до частоти 100 Гц).

• Від точки В вправо проводимо відрізок ВС з нахилом 6 дБ на октаву до точки С з ординатою 65 дБ.

Розрахункова частотна характеристика ізоляції повітряного шуму розглянутої конструкції перегородки наведена на рисунку 3.2.

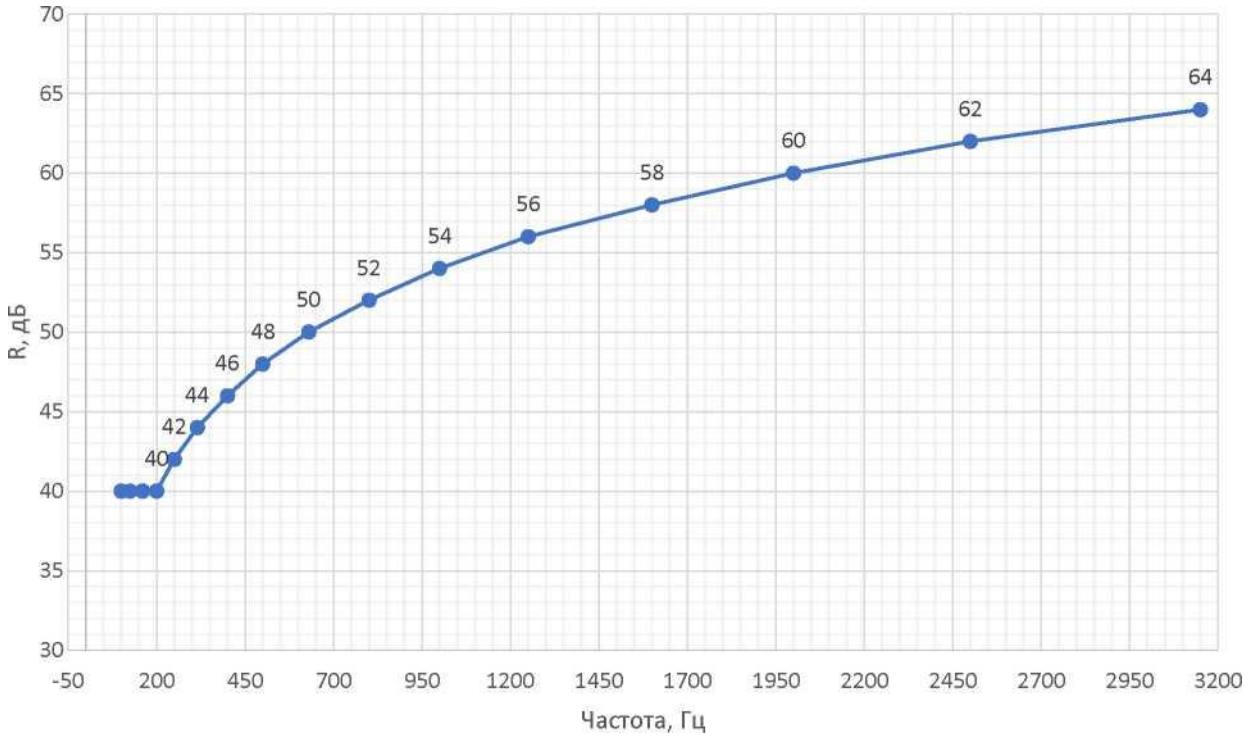


Рисунок 3.2 — Розрахункова частотна характеристика ізоляції повітряного шуму перегородки (Варіант Б)

У нормованому діапазоні частот ізоляція повітряного шуму вихідною перегородкою має значення, наведені в таблиці 3.4

Таблиця 3.4 — Ізоляція повітряного шуму перегородки (Варіант Б)

f, Гц	100	125	160	200	250	315	400	500
R, дБ	40	40	40	40	42	44	46	48
f, Гц	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150
R, дБ	50	52	54	56	58	60	62	64

Визначимо індекс ізоляції повітряного шуму R_w, розрахункова частотна характеристика якої наведена в таблиці 3.4. Розрахунок проводиться за

формою таблиці 3.5. Вносимо до таблиці значення R оцінної кривої та знаходимо несприятливі відхилення розрахункової частотної характеристики від оцінної кривої.

Таблиця 3.5 — Розрахунок несприятливих відхилень розрахункової частотної характеристики від оцінної кривої

№	Середньогеометрична частота третинооктавної смуги, Гц															
	100	125	160	200	250	315	400	**500**	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150
1	40	40	40	40	42	44	46	**48**	50	52	54	56	58	60	62	64
2	33	36	39	42	45	48	51	**52**	53	54	55	56	56	56	56	56
3	-	-	-	2	3	4	5	**4**	3	2	1	-	-	-	-	-
4	34	37	40	43	46	49	52	**53**	54	55	56	57	57	57	57	57
5	-	-	-	3	4	5	6	**5**	4	3	2	-	-	-	-	-
6								**53**								

Пункти розрахункової таблиці:

1. Розрахункова частотна характеристика R, дБ

2. Оцінна крива, дБ. Набір оцінних значень, що використовуються для порівняння з результатами вимірювань (або розрахунків) у третинооктавній смузі, наведений у таблиці 1 ДСТУ EN ISO 717-1:2022 «Акустика. Оцінка звукоізоляції в будинках та огороджувальних конструкцій. Частина 1. Ізоляція повітряного шуму».

3. Несприятливі відхилення, дБ

4. Оцінна крива, зміщена вгору на 1 дБ

5. Несприятливі відхилення від зміщеної оцінної кривої, дБ

6. Індекс ізоляції повітряного шуму R_w, дБ

Якщо сума несприятливих відхилень значно менша за 32 дБ або несприятливі відхилення відсутні, оцінна крива зміщується вгору на ціле число децибел так, щоб сума несприятливих відхилень від зміщеної оцінної кривої максимально наближалася до 32 дБ, але не перевищувала цю величину.

У цьому випадку початкова сума несприятливих відхилень становить 24 дБ, що є меншим за 32 дБ. Зміщуємо оцінну криву вгору на 1 дБ і знаходимо суму несприятливих відхилень уже від зміщеної оцінної кривої. Цього разу вона становить 32 дБ, що не перевищує нормативний ліміт 32 дБ.

За значення індексу приймається ордината зміщеної вгору оцінної кривої в третиноктавній смузі із середньогеометричною частотою 500 Гц.

У нашому випадку: R_w=53 дБ

Це значення ВІДПОВІДАЄ вимогам ДБН В.1.1-31:2013 «Захист територій, будинків і споруд від шуму» для загальних навчальних приміщень (де норма становить 48 дБ) та перевищує значення, наведені у таблиці 3.1.

3.2. Аналіз геометричної акустики залу

Теорія геометричної акустики найбільш повно враховує форму приміщення. Розроблені на її основі методи переважно використовуються для аналізу розподілу перших відбиттів від поверхонь приміщення. Останнім часом геометрична акустика (метод уявних джерел та метод трасування звукових променів) у поєднанні з обчислювальною технікою застосовується також для розрахунку низки акустичних характеристик приміщення.

У цьому випадку для оцінки геометрії залу з точки зору поширення звукових хвиль та комфортного акустичного середовища скористаємося методом розрахунку геометричної акустики, не вдаючись до спеціального програмного забезпечення. Оскільки такі програми є досить дорогими та трудомісткими у використанні для таких невеликих об'єктів, як будинки культури. Далі у п. 3 буде виконано розрахунок у COMSOL Multiphysics для

отримання результатів та їх порівняння зі спрощеними методами. Таким чином, будуть виділені основні принципи проєктування залів, які можна буде застосовувати для інших аналогічних об'єктів.

3.2.1. Реалізований варіант

Схематичний план головного залу на 150 місць (рис. 3.4). Схематичний розріз (рис. 3.3).

На схемі зображено розташування сцени та глядацьких місць, розраховане виходячи з мінімальних габаритів крісел.

Габарити та розміщення крісел для глядачів прийняті згідно з ДСТУ ГОСТ 16854:2017 «Крісла для глядацьких залів. Загальні технічні умови» та ДБН В.2.2-16:2019 «Культурно-видовищні та дозвіллєві заклади».

Аналізуючи форму та габарити залу, можна констатувати, що в ній відсутні відбивні форми стелі та стін, які сприяли б раціональнішому поширенню звуку без використання звукопідсилювального обладнання.

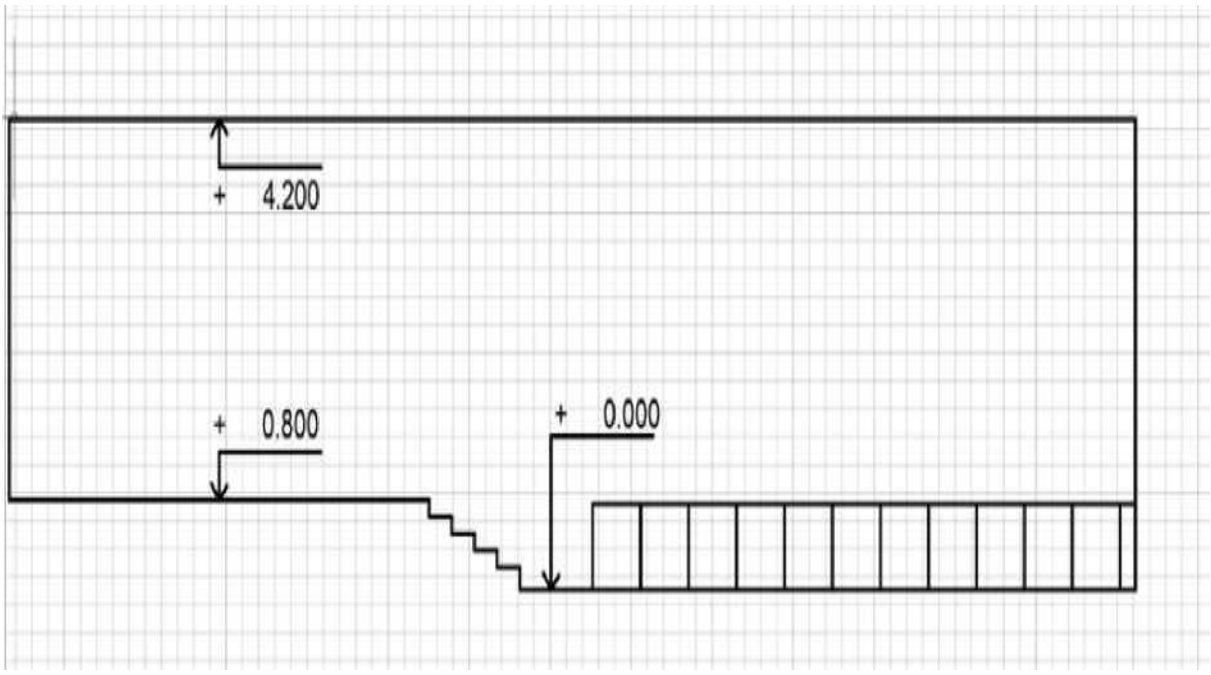


Рисунок 3.3 — Схематичний розріз головного залу

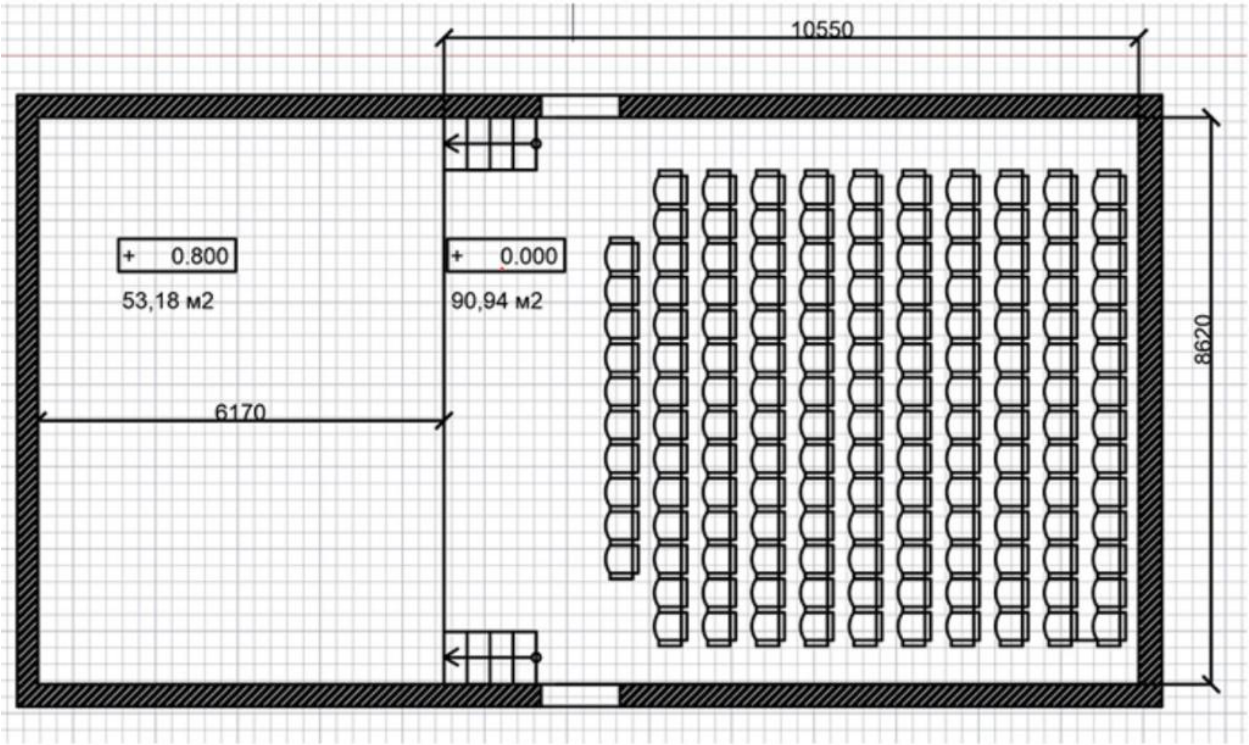


Рисунок 3.4 — Схематичний план глядацького залу

Глядацькі місця не мають підйому, хоча конструктивна система будівлі дозволяє це зробити, оскільки над залом не розташовані інші приміщення. Плоске розміщення погіршує умови оглядовості сцени для глядачів та знижує рівень чутності.

Зал не обладнаний місцями для маломобільних груп населення (МГН), що робить його недоступним для відвідування всіма категоріями громадян.

3.2.2. Розроблений альтернативний варіант проєкту глядацького залу

Головне завдання зміни форми приміщення музичного залу — ефективна геометрична побудова з метою підвищення акустичних властивостей залу та раціональне розміщення глядацьких місць із точки зору ресурсозбереження та економії простору.

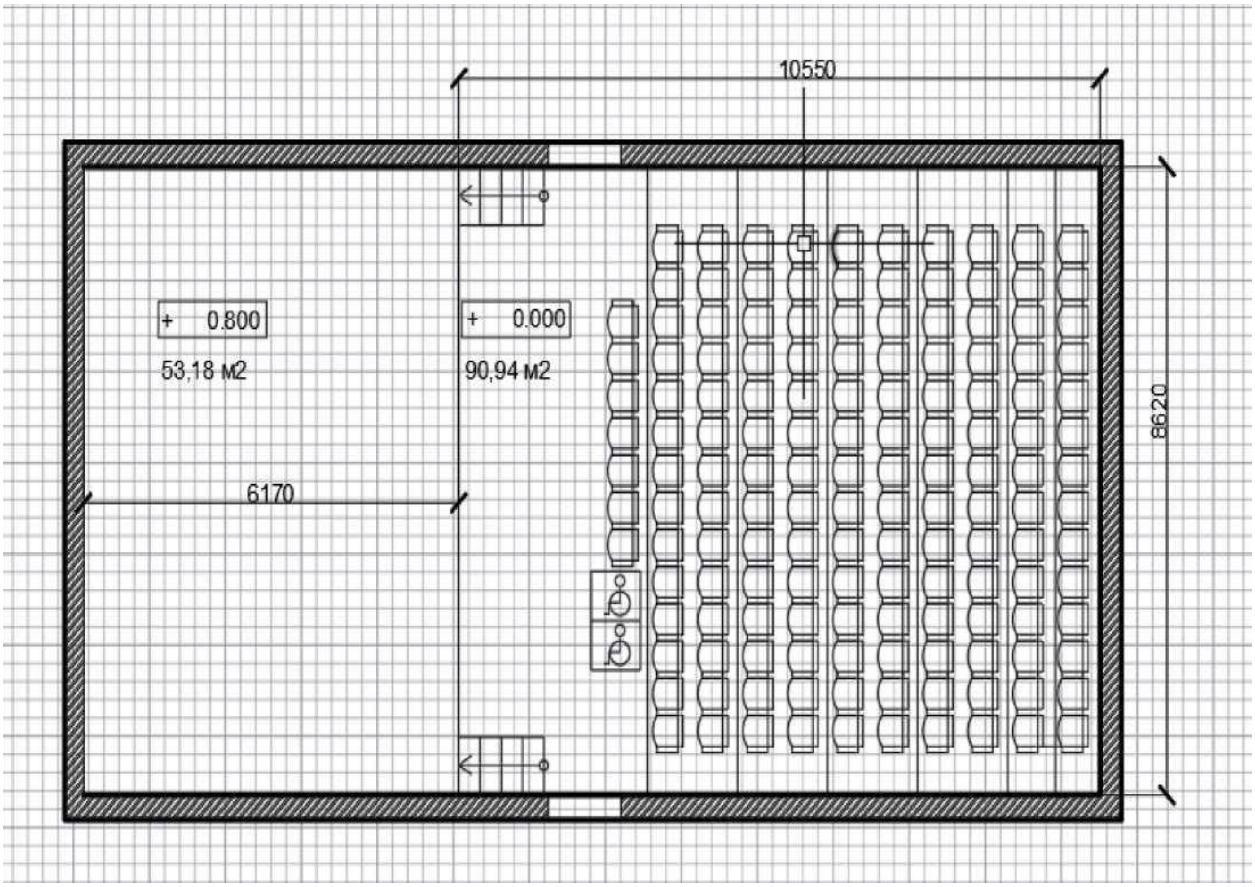


Рисунок 3.5 — Представлений удосконалений схематичний варіант плану глядацького залу

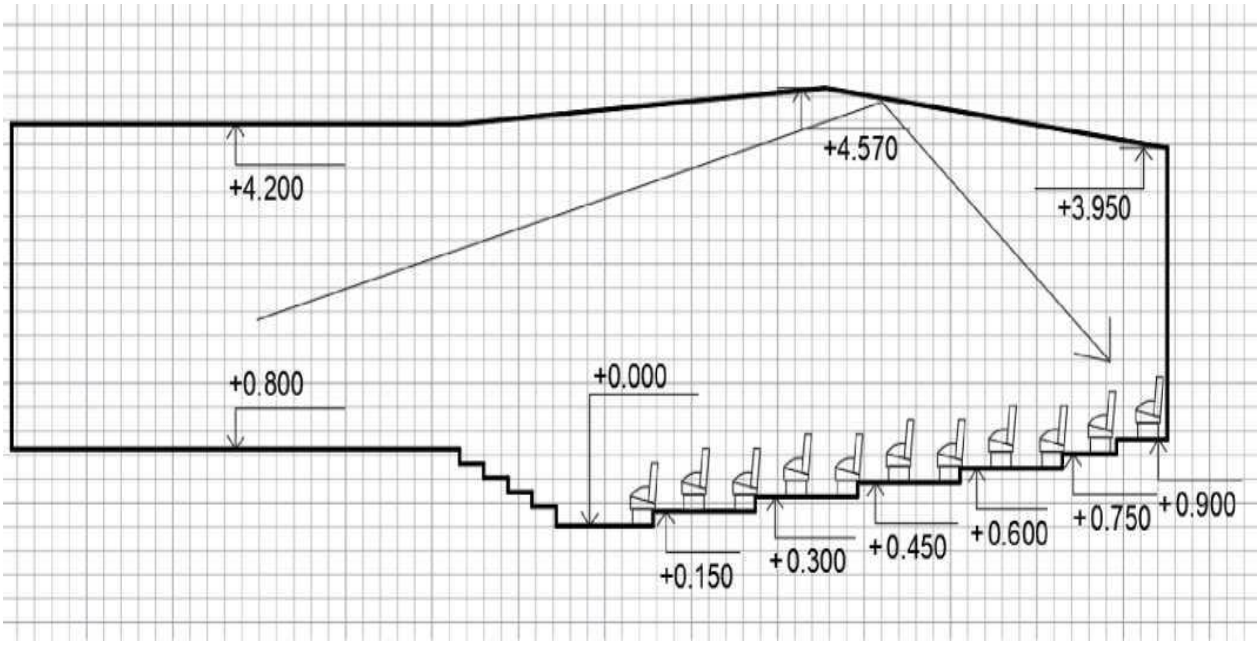


Рисунок 3.6 — Представлений удосконалений схематичний варіант розрізу глядацького залу

Під час розробки цього варіанта залу було впроваджено такі рішення:

Скіс дальнього кута перекриття стелі — реалізовано для ефективнішого спрямування відбитих звукових хвиль, що значно покращує рівень чутності на дальніх рядах залу.

Ступінчастий підйом рядів (грейфер) — забезпечує оптимальне розміщення глядацьких місць із дотриманням умов повної оглядовості сцени (відповідно до вимог ДБН В.2.2-16:2019).

Облаштування місць для маломобільних груп населення (МГН) — додано спеціалізовані глядацькі місця, доступ до яких спроєктовано безперешкодним для пересування (згідно з нормами інклюзивності ДБН В.2.2-40:2018).[6]

3.3. Створення акустичних моделей приміщення в середовищі COMSOL Multiphysics та прогнозування показників реверберації

На даному етапі будуються дві геометричні моделі залу, що відповідають п. 2.1 та п. 2.2. Перший варіант залу — це реалізований проєкт будинку культури, а другий — розроблений запропонований альтернативний варіант, у якому за спрощеною методикою вдосконалено геометричну форму залу.

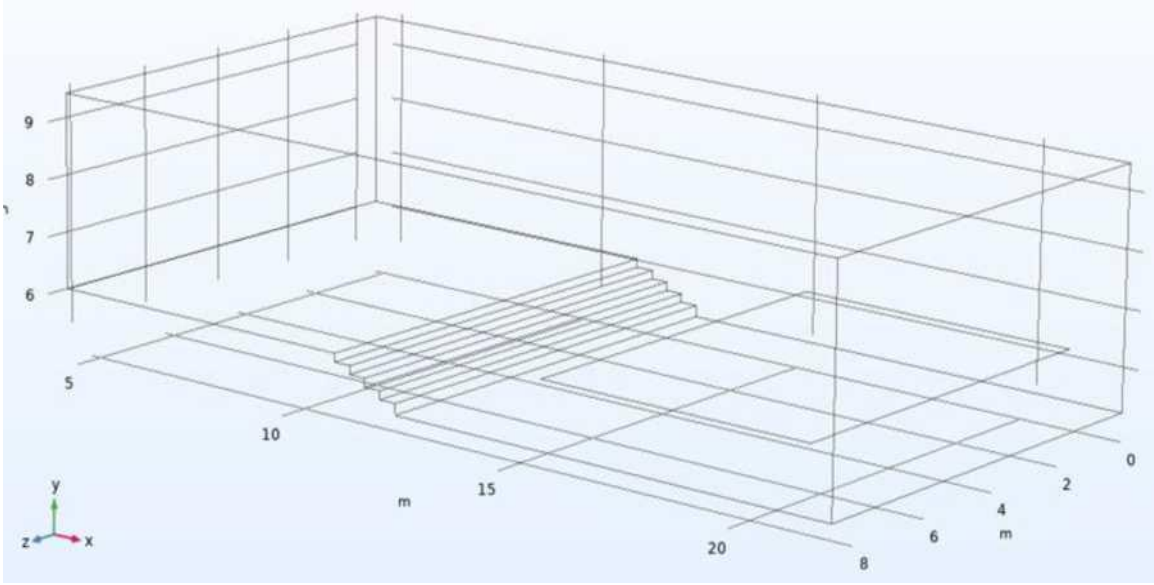


Рисунок 3.7 — 3D-модель музичного залу до реконструкції

Далі проводиться геометричний розрахунок акустики залів у програмному комплексі COMSOL Multiphysics. Аналізуємо, як зміна форми залу вплинула на якість акустичного середовища. Визначаємо загальні принципи, якими можна керуватися, не вдаючись до точного комп'ютерного моделювання, що дозволяє спростити процес реконструкції малих музичних залів.

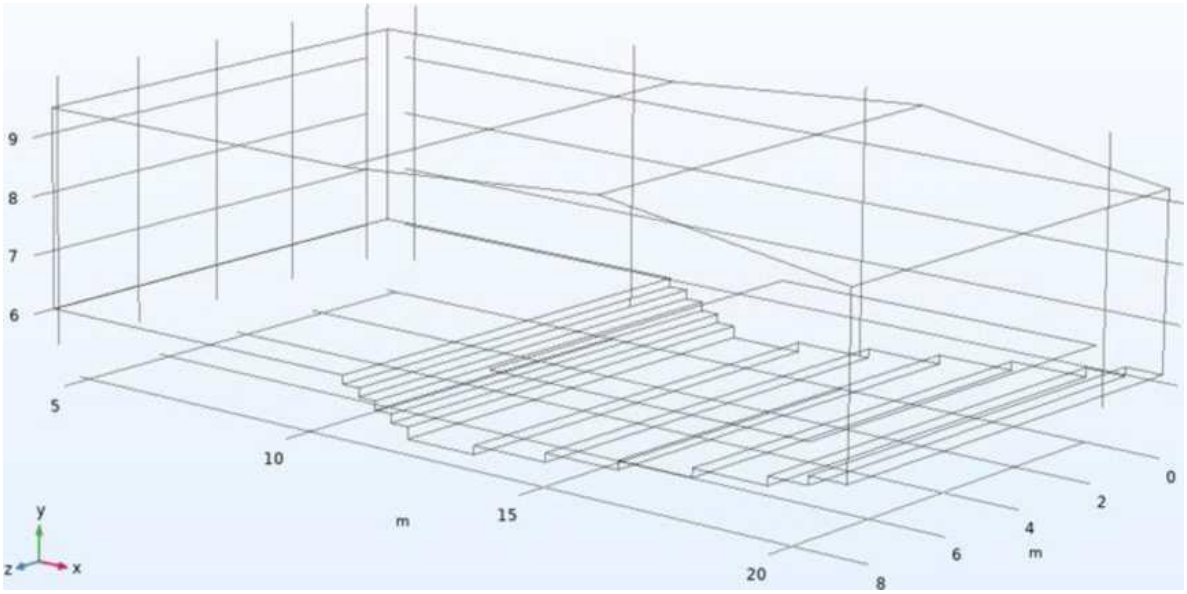


Рисунок 3.8 — 3D-модель музичного залу (запропонований варіант)

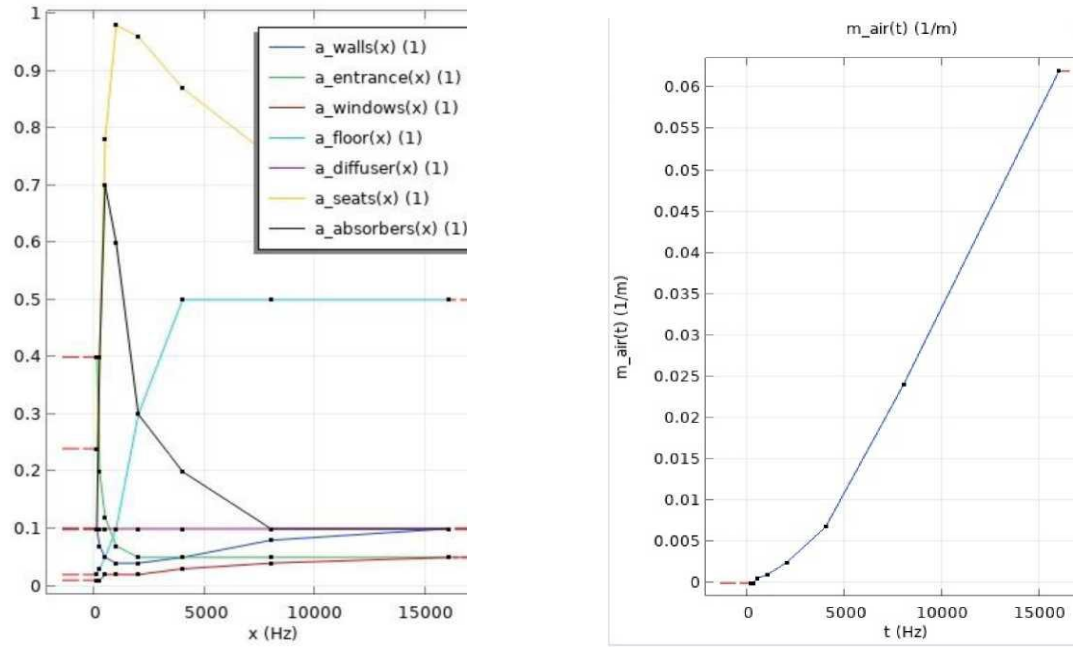


Рисунок 3.9 — Графіки залежності коефіцієнтів звукопоглинання поверхнями залу та поглинання в об’ємі повітря

Оптимальний час реверберації для залу такого призначення, об’єму та кількості відвідувачів становить Т=0,6 с.

У першому варіанті залу до модернізації (рис. 3.7) час реверберації склав Т=0,75 с. Це перевищує оптимальне значення на 25%, що є неприпустимим.

У другому варіанті залу (рис. 3.8) час реверберації склав Т=0,66 с. Це відповідає вимогам із допустимим перевищенням на 10%.

Таким чином, ми бачимо значну різницю в якості акустичного середовища приміщення

3.4.Економічне порівняння одношарової та двошарової конструкцій з точки зору звукоізоляційних характеристик

На сьогодні існує величезна кількість будівель з особливим акустичним режимом, у яких надлишковий об'єм, неправильні габарити, форми стелі та підлоги негативно впливають на загальний акустичний комфорт приміщень. Проте також найважливішим фактором, що визначає якість приміщення, є матеріали, які використовуються під час будівництва, капітального ремонту та оздоблення.

Звукоізоляція між глядацьким залом та іншими приміщеннями залежить від їхнього взаємного розташування і може бути різною. Очевидно, що суміжні приміщення передають шумовий вплив одне одному значно інтенсивніше, ніж якби вони були, наприклад, розосереджені. Тому варто звернути увагу на функціональну схему будівлі, оцінити та розташувати максимально вигідно з точки зору шуму ті приміщення, які потребуватимуть особливої уваги при вирішенні питань звукоізоляції та акустики в аспекті вибору типів матеріалів.

Звукоізоляція репетиційних залів і класів є надзвичайно важливою і має бути ретельно продуманою. Разом із цим, простого обшивання стін, звуко- та віброізоляції підлог чи перегородок може виявитися недостатньо. У сукупності важлива не лише кількість і товщина звукоізоляційного

акустичного матеріалу, а й: якість виконання з’єднань, правильність облаштування примикань, технічне виконання вузлів у місцях сполучення різних конструкцій, що підлягають процедурі підвищення звукоізоляції.

Правильне проектування вузлів та контроль монтажу підвищують якість звукоізоляції, зменшують витрати на акустичні матеріали та не «з’їдають» корисну площу приміщення. Таким чином, першим кроком є раціональний вибір акустичних матеріалів, який залежить від принципу їхньої роботи, вимог щодо шумоізоляції та необхідних акустичних характеристик.

Правильний підбір матеріалу на етапі проектування в майбутньому допоможе заощадити на переобладнанні та додатковій модернізації приміщень за допомогою складних конструкцій і пристроїв.

3.4.1. Економічний розрахунок

Під час розрахунку індексу звукоізоляції було запропоновано два варіанти перегородок між основним музичним залом та гримерними, що задовольняють вимоги ДБН В.1.1-31:2013 «Захист територій, будинків і споруд від шуму» для будівель культурно-видовищних закладів:

- Варіант А — перегородка зі стінових бетонних блоків (згідно з ДСТУ Б В.2.7-7:2008) товщиною 90 мм із шаром штукатурки та облицюванням гіпсокартонними листами 12,5 мм (ДСТУ EN 520:2018).
- Варіант Б — перегородка з важкого бетону густиною 2400 кг/м³ (ДСТУ EN 206:2018) товщиною 160 мм.

Локальні кошторисні розрахунки виконані згідно з «Настановою з визначення вартості будівництва» (Наказ Мінрегіону №281) у поточних цінах станом на 2025 рік.

Вартісні показники варіантів :

1. За Варіантом А: Кошторисна вартість зведення перегородок із легкобетонних каменів з облицюванням гіпсокартоном складає орієнтовно 185 450,00 грн, у тому числі витрати на оплату праці — 32 200,00 грн.

2. За Варіантом Б: Кошторисна вартість зведення монолітних перегородок складає орієнтовно 288 600,00 грн, у тому числі витрати на оплату праці — 26 150,00 грн.

Нормативи прибутку та загальновиробничих витрат.

Показники прийняті відповідно до чинних методик визначення вартості будівництва в Україні.

Таблиця 3.6 — Рекомендовані нормативи прибутку (за видами робіт)

Види будівельних та монтажних робіт	Нормативи прибутку у % до фонду оплати праці (ФОП)
Конструкції з цегли та блоків	80
Оздоблювальні роботи	55
Бетонні та залізобетонні монолітні конструкції (житлово-цивільне будівництво)	77

Таблиця 3.7 — Показники загальновиробничих витрат (ЗВВ)

Види будівельних та монтажних робіт	Нормативи ЗВВ у % до фонду оплати праці (ФОП)
Конструкції з цегли та блоків	122
Оздоблювальні роботи	105
Бетонні та залізобетонні монолітні конструкції (житлово-цивільне будівництво)	155

Резерв коштів на непередбачені роботи та витрати: згідно з нормами для об’єктів соціальної сфери (заклади культури) прийнято у розмірі 2%.

Кошти на зведення та розбирання титульних тимчасових будівель і споруд для об’єктів цивільного будівництва (театри, картинні галереї, адміністративні будівлі) згідно з ДБН прийнято норматив 1,8%.

3.4.2. Вибір оптимального варіанта

З проведених розрахунків випливає, що найбільш вигідним є Варіант А — перегородка зі стінових бетонних блоків (згідно з ДСТУ Б В.2.7-7:2008) завтовшки 90 мм із шаром штукатурки та облицюванням гіпсокартоном 12,5 мм (згідно з ДСТУ EN 520:2018).

Аналіз отриманих показників вартості зведення перегородок дозволяє зробити висновок про високу ефективність застосування багатошарових конструкцій як з точки зору забезпечення нормативної звукоізоляції, так і в аспекті економії коштів.

Економічні розрахунки підтверджують, що просте збільшення товщини одношарової конструкції не є ефективним способом вирішення питань звукоізоляції з погляду фінансових витрат. Суттєвим недоліком «важких» рішень також є зменшення корисної площі приміщень через значні габарити конструкцій. Використання легких багатошарових систем дозволяє знизити загальний кошторис будівництва на 35–45%.

3.5. Методологія інтегрованого забезпечення звукоізоляції та акустичної якості середовища в універсальних залах при проведенні реконструкції

Методи покращення звукоізоляції:

- Вибір звукоізоляційного матеріалу має ґрунтуватися на принципі його дії щодо певних видів шуму (повітряного, ударного) та специфіки

застосування.

- Переважне застосування двошарових та багатошарових конструкцій перегородок та облицювань, що забезпечує вищий індекс Rw при меншій масі.
- Відмова від жорсткого каркаса на користь підвісних стель, плаваючих підлог та пружного закріплення стін (вібророзв'язка).
- Допустиме зменшення жорсткості вузла сполучення перегородок із перекриттям та елементів перегородок між собою. Підвищення звукоізоляції елементів можливе за рахунок зменшення згинальної жорсткості, що сприяє кращому звукопоглинанню конструкції.
- Об’ємно-планувальне рішення має враховувати розташування приміщень, які потребують особливих показників звукоізоляції.
- Розосередження «шумних» та «тихих» зон для мінімізації передачі звукових хвиль через суміжні конструкції.

Методи покращення акустичного середовища залу:

- Дотримання необхідного питомого об’єму приміщення на одного глядача, виходячи з функціонального призначення залу (музичний, театральний чи універсальний).
- Вибір раціональної форми поверхонь залу для забезпечення рівномірного розподілу перших звукових відбиттів та уникнення акустичних дефектів (ехо, звукові тіні).
- Вибір відповідних звукопоглиначів та їх правильне розташування на поверхнях залу (стелі, стінах, задній стінці).
- Забезпечення необхідної звукоізоляції залу як від зовнішніх (вуличних), так і від внутрішніх (техногенних) шумів.

Таблиця 3.8 — Комплексне раціональне вирішення питань звукоізоляції та акустичного комфорту залів

Етап	Дії
1. Передпроєктний аналіз	На цьому етапі визначаються: функціональна схема будівлі, кількість посадокових місць у залі; розраховується необхідний об’єм приміщення та визначається специфіка його використання; встановлюються вимоги до акустичного та звукового режиму приміщення.
2. Акустичне моделювання	Будується геометрична модель поширення звукових хвиль у приміщенні; розраховується час реверберації; визначаються найбільш вигідні положення для встановлення звукових відбивачів. Встановлюється оптимальне положення сцени та глядацьких місць у плані та по висоті (профіль підлоги — грейфер).
3. Технологічне забезпечення	Виконується підбір матеріалів та конструкцій за принципом їхньої акустичної дії. Перевага надається багатошаровим конструкціям із застосуванням систем вібророзв'язки та зменшенням жорсткості вузлів сполучення.

3.6 Висновки до розділу 3

На основі проведеного аналізу зроблено такі висновки:

1. Підтверджено перевагу застосування багатошарових конструкцій, які дозволяють досягти нормативного індексу звукоізоляції повітряного шуму ($R_w \approx 55$дБ) згідно з ДБН В.1.1-31:2013 при меншій загальній масі.

2. Просте збільшення товщини одношарової конструкції не є ефективним методом вирішення питань звукоізоляції. Це спричиняє надмірні

витрати матеріалів та збільшує навантаження на несучі конструкції будівлі.

3. Важливим недоліком «важких» монолітних рішень є зменшення корисної площі приміщень через великі габарити конструкцій. Застосування обраного Варіанта А дозволяє зберегти корисний об’єм залу.

4. Розраховано час реверберації Т60, який для вдосконаленого варіанта залу становить 0,66 с. Це відповідає вимогам до музичних залів із допустимим відхиленням у 10% від оптимуму.

.

ОСНОВНІ ВИСНОВКИ

У цій роботі було проведено аналіз планувальних рішень, форм поверхонь та об’ємів музичних залів цільового призначення. Сформульовано висновки щодо застосування різних способів, які підвищують рівень звукоізоляції. Розглянуто вплив функціональної схеми будівлі на необхідні рівні шумової ізоляції суміжних приміщень.

1. Виявлено послідовність принципових рішень при виборі матеріалів з точки зору їхньої акустичної дії («роботи на звук») та специфіки застосування.

2. Оцінено доцільність застосування одношарових та двошарових конструкцій перегородок. Складено локальні кошториси, результати яких підтверджують ефективність багатошарових систем. Використання легких багатошарових конструкцій дозволяє уникнути перевитрати коштів (економія до 45%) та матеріалів.

3. Запропоновано методики підвищення звукоізоляції та покращення акустичного середовища приміщень. Визначено алгоритм прийняття рішень при виборі спеціалізованих матеріалів.

.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Закон України «Про культуру» від 14.12.2010 № 2778-VI (зі змінами).

2. Постанова Кабінету Міністрів України від 12 лютого 2020 р. № 121 «Про затвердження Порядку та умов надання субвенції з державного бюджету місцевим бюджетам на розвиток мережі закладів культури».

3. Нормативно-правові акти та державні стандарти Закон України «Про культуру» від 14.12.2010 № 2778-VI (зі змінами).

4. ДБН В.1.1-31:2013. Захист територій, будинків і споруд від шуму. Київ : Мінрегіон України, 2014. 82 с

5. ДБН В.2.2-16:2019. Культурно-видовищні та дозвіллєві заклади. Київ : Мінрегіон України, 2019. 95 с.

6. ДБН В.2.2-16:2019. Культурно-видовищні та дозвіллєві заклади. Київ : Мінрегіон України, 2019. 95 с.

7. ДСТУ-Н Б В.1.1-33:2013. Настанова з розрахунку і проєктування звукоізоляції огороджувальних конструкцій житлових і громадських будівель. Київ : Мінрегіон України, 2014. 120 с.

8. ДСТУ-Н Б В.1.1-33:2013. Настанова з розрахунку і проєктування звукоізоляції огороджувальних конструкцій житлових і громадських будівель. Київ : Мінрегіон України, 2014. 120 с.

9. ДСТУ EN 12354-1:2010. Акустика будівельна. Оцінювання акустичних характеристик будівель за характеристиками елементів. Частина 1. Ізоляція повітряного шуму між приміщеннями.

10. ДСТУ EN 12354-1:2010. Акустика будівельна. Оцінювання акустичних характеристик будівель за характеристиками елементів. Частина 1. Ізоляція повітряного шуму між приміщеннями.

11. Дідковський В. С., Луньова С. А., Богданов О. В. Архітектурна акустика : навч. посіб. Київ : НТУУ «КПІ», 2012. 384 с.

12. Сергейчук О. В. Будівельна фізика. Акустика : навч. посіб. Київ :

КНУБА, 2012. 160 с

13. Плоський В. О. та ін. Архітектурна фізика : підручник для ВНЗ. Київ : Фенікс, 2014. 544 с.

14. Тимофієнко В. І. Історія архітектури Стародавнього світу. Київ : Наукова думка, 2006. 512 с.

15. Дідковський В. С., Луньова С. А. Акустична експертиза та корекція приміщень : монографія. Київ : НТУУ «КПІ», 2010. 250 с.

16. Зубченко В. П. Акустика залів та студій : навч. посіб. Київ : Інститут кіно і телебачення, 2015. 180 с.71-73.

17. Шліх А. Історія виникнення залів різноманітного призначення. *Матеріали XVIII університетської науково-практичної конференції «МОЛОДА НАУКА-2025»*. Запоріжжя : ЗНУ, 2025. С

18. Методичні рекомендації щодо створення Центрів культурних послуг у територіальних громадах. Міністерство культури та стратегічних комунікацій України, 2021.

19. Литвинцева Г. Ю. Креативні простори — аудиторії нового типу : міжнар. наук.-дослід. журн. Київ : Фоліо, 2016. 202 с.

20. Харитонова А. А. Архітектурно-планувальне формування центрів образотворчого мистецтва. Київ : КНУБА, 2005. 20 с.

21. Олійник О. П., Гнатюк Л. Р., Чернявський В. Г. Основи дизайну інтер’єру : навч. посіб. Київ : НАУ, 2011. 228 с.

22. Орлова О. О. Екологічний фактор формоутворення в дизайні. Харків : ХДАДМ, 2003. 267 с.

23. Петришин Г. П. Історичні архітектурно-містобудівні комплекси: наукові методи дослідження : навч. посіб. Львів : Львівська політехніка, 2006. 212 с.

24. Приймук М. О. Дизайн інтер’єру : навч. посіб. Київ : Кондор, 2010. 256 с.

25. Абизов В. А. Методологічні основи розвитку архітектурно-будівельних систем в умовах реформування житлової та містобудівної

політики України : автореф. дис. ... д-ра архітектури : 18.00.01. Харків, 2001. 32 с.

26. Андріанова Г. А. Принципи архітектурно-планувальної організації об’єктів громадського обслуговування в умовах реконструкції житлових кварталів : автореф. дис. ... канд. архітектури : 18.00.02. Одеса, 2006. 20 с.

27. Архітектурні плани побудови українського театру у Львові. Державний історичний архів (ДІА) у Львові. Ф. 514. Оп. 1. Спр. 137.

28. Білоконь Ю. М. Еволюційні тенденції в теорії та методології регіонального планування : автореф. дис. ... д-ра архітектури : 18.00.02. Київ, 2003. 36 с.

29. Гой Б. В. Архітектура єврейських театрів України. Принципи типології проектування : дис. ... канд. архітектури : 18.00.02. Львів, 2006. 267 с.

30. Кузьміна Г. В. Принципи комплексного формування підприємств дрібнороздрібної торгівлі : автореф. дис. ... канд. архітектури : 18.00.01. Київ, 2005. 20 с.

31. Культові будинки і споруди різних конфесій : посібник з проектування / В. В. Куцевич та ін. ; за заг. ред. В. В. Куцевича. Київ : КиївЗНДІЕП, 2002. 117 с.

32. Куцевич В. В. Типологія та нормативне забезпечення проектування житлових та громадських будівель. *Перспективні напрямки проектування житлових та громадських будівель : зб. наук. праць КиївЗНДІЕП*. Київ, 2003. С. 22–28.

33. Куцевич В. В. Реформування архітектурно-методологічної бази проектування об’єктів соціокультурного призначення в сучасних умовах України : дис. ... д-ра архітектури : 18.00.02. Київ, 2004. 455 с.

34. Прокопенко О. В. Принципи формування центрів професійно-трудової реабілітації інвалідів та інших маломобільних груп населення : автореф. дис. ... канд. архітектури : 18.00.02. Київ, 2007. 20 с.

35. Проскуряков В. І. Феномен архітектури міського театру в Чернівцях. *Архітектурна спадщина Чернівців Австрійської доби : зб. матеріалів міжнар. наук. конф.* Чернівці : Золоті литаври, 2003. С. 147–158.

36. Проскуряков О. В. Актуальність творчості австрійських архітекторів Ф. Фельнера і Г. Гельмера для сучасного житлового будівництва України. *Перспективні напрями проектування житлових та громадських будівель : зб. наук. пр.* Київ : КиївЗНДІЕП, 2006. Спец. вип. : Комплексний розвиток житлового середовища. С. 30–33.

37. Szyszkowitz M., Kowalski K. Innovation Eines Kaufhauses in Graz: Haus der Architektur, Graz, 1995, S. 54–69.

38. Planstadte der Neuzeit vom 16 bis zum 18 Yahrehundert, Dfdishes Landesmuseum Karlsrume: Braun, Karlsruhne, 1990 — S. 379.

39. Purchla J. Jan Zawiejski. Architekt przelomu XIX I XX wieku. — Warszawa: Panst. Wyd. Naukowe, 1986. — S. 36–38.

40. Jodidio Ph. New Forms. Architektur in den 90er Janren. — Koln, Lisboa, London, New York, Paris, Tokyo: TASCHEN, 1997. — 237 S.

41. Kadluczka A. Restauracia I modernizacja Teatru miejskiego w Krakowie. — Architekt. 1991. — Zeszyt 3. — Krakow. — S. 16–29.

42. Klein D. Fellner & Helmer. Wiener Atelier mit weltgeltung. In: Baukultur 4. 1997.— S. 42–51.

43. Kurreut Friedrich, Spalt Johannes. Der Osterreichische Beitrag zum modernen theater bau. Architektur Bau forum. Wien 1. 1988. — P. 63–73.