

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ФАКУЛЬТЕТ БУДІВНИЦТВА ТА ЦИВІЛЬНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ

КАФЕДРА МІСЬКОГО БУДІВНИЦТВА І ГОСПОДАРСТВА  
(повна назва кафедри)

**Кваліфікаційна робота / проект**

другий рівень (магістерський)  
(рівень вищої освіти)

тему «Аналіз процесу поширення звуку в цивільних будівлях»

Виконав: студент 2 курсу, групи БУД-18-5мді  
спеціальності 192 Будівництво та цивільна  
інженерія  
(код і назва спеціальності)

освітньої програми «Міське будівництво та  
господарство»  
(код і назва освітньої програми)

спеціалізації \_\_\_\_\_  
(код і назва спеціалізації)

Ель Хадж Хаммад Уссама  
(ініціали та прізвище)

Керівник проф. Ткаченко В.Б.  
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Рецензент доц.к.т.н. Фосташенко О.М.  
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Запоріжжя  
2020

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет факультет будівництва та цивільної інженерії  
Катедра міського будівництва і господарства  
Рівень вищої освіти другий рівень (магістерський)  
Спеціальність 192 Будівництво та цивільна інженерія  
(код та назва)  
Навчальна програма Міське будівництво та господарство  
(код та назва)  
Спеціалізація \_\_\_\_\_  
(код та назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри Григорук А.В.

« 02 » \_\_\_\_\_ 09 20 19 року

**ЗАВДАННЯ**  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ/ПРОЕКТ СТУДЕНТОВІ (СТУДЕНТЦІ)

Ель Хадж Хаммад Уссама

(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема роботи (проекту) Аналіз процесу поширення звуку в цивільних будівлях

Рівень роботи Ткаченко В.Б., проф.  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ЗНУ від «10»09 2019 року № 1542-с



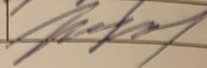

Строк подання студентом роботи 28.12.2019

Вихідні дані до роботи актуальність обраного напрямку досліджень; обґрунтованість розвинення проблематики; перспективи впровадження розробок; етапи роботи; завдання до виконання, об'єкт дослідження, предмет дослідження; методи дослідження

Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розв'язати) Літературний огляд. Аналіз алгоритмів і програм розрахунку коефіцієнтів проходження хвиль через стики будівельних конструкцій. Проаналізована повніша модель поширення звуку і вібрації у будівлі, яка, в результаті розвитку методу статистичного енергетичного аналізу. Охорона праці.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових)  
 Від восьми графічних аркушів із результатами аналітичних  
 наукового напрямку досліджень, результатами експериментальних  
 результати розрахунків із застосуванням сучасних інформаційних  
 досліджень.

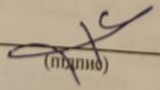
6. Консультанти розділів роботи

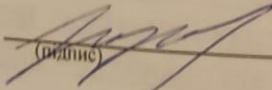
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата
		завдання видав
1	Ткаченко В.Б.	
2	Ткаченко В.Б.	
3	Ткаченко В.Б.	
4	Ткаченко В.Б.	

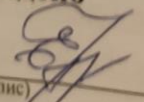
7. Дата видачі завдання 2.09.2019

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи
1	Літературний огляд.	15.10
2	Розділ 1	30.10
3	Розділ 2	8.11
4	Розділ 3	29.11
5	Охорона праці.	10.12
6	Розробка графічної частини.	15.12
7	Оформлення роботи.	27.12
8	Попередній захист	28.12

Студент  (підпис) Ель Хадж Хаммад Уссама  
 (ініціали та прізвище)

Керівник роботи (проекту)  (підпис) В.Б Ткаченко  
 (ініціали та прізвище)

Нормоконтроль пройдено  
 Нормоконтролер  (підпис) О.М. Фосташенко  
 (ініціали та прізвище)

## АНОТАЦІЯ

Ель Хадж Хаммад Уссама. Аналіз процесу поширення звуку в цивільних будівлях.

Кваліфікаційна випускна робота для здобуття ступеня вищої освіти магістра за спеціальністю 192 - Будівництво та цивільна інженерія, науковий керівник В.Б. Ткаченко. Запорізький національний університет. Інженерний інститут. Факультет будівництва та цивільної інженерії, кафедра міського будівництва і господарства, 2020.

Дан аналіз алгоритмів і програм розрахунку коефіцієнтів проходження хвиль через стики будівельних конструкцій. Проаналізована повніша модель поширення звуку і вібрації у будівлі, яка, в розвиток методу статистичного енергетичного аналізу, розглядає конструктивні елементи будівлі як сукупність підсистем, що мають енергію вигинистих, подовжніх і сдвигових хвиль.

Ключові слова: ЗВУК, ХВИЛІ, АЛГОРИТМ, МОДЕЛЬ ПОШИРЕННЯ ЗВУКУ, КОНСТРУКТИВНІ ЕЛЕМЕНТИ, ЕНЕРГІЯ.

## ABSTRACT

El Haj Haj Hammad Ussama. Analysis of the process of sound propagation in civilian buildings.

Qualifying graduation work for the degree of master's degree in specialty 192 - Construction and civil engineering, supervisor V.B. Tkachenko. Zaporizhzhya National University. Engineering Institute. Faculty of Construction and civil engineering, Department of Urban Construction and Economics, 2020.

The analysis of algorithms and programs for the calculation of the coefficients of the passage of waves through the joints of building structures is given. A more complete model of sound propagation and vibration in a building is analyzed, which, in the development of the method of statistical energy analysis,

considers the structural elements of a building as a set of subsystems having the energy of bending, longitudinal and shear waves.

Keywords: SOUND, WAVES, ALGORITHM, MODEL OF SOUND DISTRIBUTION, STRUCTURAL ELEMENTS, ENERGY.

## АННОТАЦИЯ

Эль Хадж Хаммад Уссама. Анализ процесса распространения звука в гражданских зданиях.

Квалификационная выпускная работа для получения степени высшего образования магистра по специальности 192 - Строительство и гражданская инженерия, научный руководитель В.Б. Ткаченко. Запорожский национальный университет. Инженерный институт. Факультет строительства и гражданской инженерии, кафедра городского строительства и хозяйства, 2020.

Дан анализ алгоритмов и программ расчета коэффициентов прохождения волн через стыки строительных конструкций. Проанализирована полнее модель распространения звука и вибрации в здании, которое, в развитие метода статистического энергетического анализа, рассматривает конструктивные элементы здания как совокупность подсистем, имеющих энергию изгибных, продольных и сдвиговых волн.

Ключевые слова: ЗВУК, ВОЛНЫ, АЛГОРИТМ, МОДЕЛЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗВУКА, КОНСТРУКТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ, ЭНЕРГИЯ.

## ЗМІСТ

ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1. РЕТРОСПЕКТИВНИЙ АНАЛІЗ І СУЧАСНЕ СТАН ТЕОРІЇ І МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ ПОШИРЕННЯ ЗВУКУ ВИДАННЯХ	8
1.1 Проблеми захисту від шуму і вібрації в цивільних будівлях	8
1.2 Методи розрахунку поширення звуку у будівлях	17
1.3 Метод статистичного енергетичного аналізу (СЕА)	32
1.4 Теорія і експериментальні дослідження поширення звукової вібрації через стики будівельних конструкцій	38
1.5 Висновки по першому розділу	42
РОЗДІЛ 2 . РОЗВИТОК МЕТОДОЛОГІЇ СТАТИСТИЧНОГО ЕНЕРГЕТИЧНОГО АНАЛІЗУ З УРАХУВАННЯМ ОСОБЛИВОСТЕЙ ОБ'ЄМНО-ПЛАНУВАЛЬНИХ РІШЕНЬ ЦИВІЛЬНИХ БУДІВЕЛЬ	44
2.1 Основні принципи системного підходу до проектування звукоізоляції в цивільних будівлях	44
2.2 «Повна» модель статистичного енергетичного аналізу	48
2.3 Об'ємно-планувальні елементи будівлі і розрахункові схеми фрагментів будівлі в розрахунку методом статистичного енергетичного аналізу	51
2.4 Конструктивні елементи і вузли будівлі, їх розрахункові схеми	61
2.5 Висновки по другому розділу	69
РОЗДІЛ 3. ПРУЖНІ І ДИСИПАТИВНІ ВЛАСТИВОСТІ КОНСТРУКЦІЙНИХ І ЗВУКОІЗОЛЯЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ	71
3.1 Пружні і дисипативні властивості конструкційних матеріалів	71
3.2 Пружні і дисипативні властивості звукоізоляційних матеріалів	74
3.3 Пружні властивості звукоізоляційних матеріалів у статичному режимі навантаження	75
3.4 Динамічні властивості звукоізоляційних матеріалів при малих і великих статичних навантаженнях	81
3.5 Методика виміру динамічних характеристик звукоізоляційних матеріалів	84
3.6 Результати виміру динамічних характеристик деяких звукоізоляційних матеріалів при статичних навантаженнях до 10 МПа	90
3.7 Висновки по третьому розділу	95
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА	96
ВИСНОВКИ	103
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	105

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Звукоізоляція приміщень в цивільних будівлях значною мірою визначається не лише конструктивними параметрами конструкцій, що власне захищають, розділяють приміщення, але і умовами поширення звукової вібрації по суміжних конструкціях будівлі. Акустичні і вібраційні (ударні) джерела звуку викликають в конструктивному остові будівлі звукову вібрацію у вигляді пружних хвиль: поперечних, подовжніх і вигинистих. Поєднання ряду чинників, таких як, високий модуль пружності і низькі диссипативні властивості матеріалів стін і перекриттів, жорсткість їх стиків, наявність у будівлях досить потужних джерел шуму і вібрації призводить до порушення умов акустичного комфорту в приміщеннях, ближніх і віддалених від джерела.

Вирішення проблеми звукоізоляції вимагає системного підходу, що включає не лише поліпшення власної звукоізолюючої здатності конструкцій, що захищають, але і оптимізацію об'ємнопланувальних і конструктивних рішень будівлі в цілому. Такий підхід може бути заснований на віброакустичному розрахунку будівлі або його фрагмента. Це дозволяє при заданих акустичних навантаженнях обчислювати власне рівні шуму в приміщеннях, а при необхідності, і рівні вібрації на конструкціях, тобто безпосередньо ті параметри, які відбивають акустичний режим в приміщеннях і регламентуються санітарними нормами.

При розробці фізичної моделі поширення звуку і вібрації у будівлі слід ґрунтуватися на теоретичних положеннях методу статистичного енергетичного аналізу (СЕА), широко відомого за кордоном. Застосування СЕА дозволяє знаходити рішення завдань будівельної акустики в енергетичній постановці шляхом складання рівнянь балансу енергії хвиль в приміщеннях і конструкціях будівлі. Розвиток методу СЕА шляхом розробки повнішої моделі енергетичного обміну між хвилевими полями в конструкціях і приміщеннях дозволяє поліпшити точність і розширити сферу

застосування методу. Слід вирішити і ряд приватних завдань обчислення власних параметрів коливань конструкцій і приміщень і характеристик проходження хвиль через їх сполучення.

Розвиток методології віброакустичного розрахунку цивільних будівель є актуальним напрямом наукових досліджень у будівельній акустиці, оскільки дозволяє вирішити ключові завдання теорії поширення звуку і вібрації і створює основи системи автоматизованого проектування звукоізоляції в цивільних будівлях, побудованої на сучасних теоретичних знаннях і комп'ютерних технологіях.

**Мета і завдання дослідження.** Розвиток теорії і методології розрахунку ізоляції шуму і вібрації в цивільних будівлях на основі повної моделі поширення енергії хвиль по будівельних конструкціях і через їх стики, аналіз теоретичних основ автоматизованої системи проектування звукоізоляції.

**Об'єкт дослідження.** Процес проходження звукових хвиль через стики стрижневих конструкцій з пружними прокладками.

**Предмет дослідження.** Дослідження власних коливань будівельних конструкцій і аналіз методики розрахунку власних частот, числа і щільність мод коливань з урахуванням дискретності власних функцій коливань і дисперсії хвиль.

**Методи дослідження.** При рішення поставлених завдань використовувалися узагальнення і аналіз теоретичних і практичних досліджень по темі роботи. Системний підхід є методологічною основою усього дослідження і використовується для вирішення більшості поставлених завдань. Аналіз і моделювання використані при виконанні розрахунків.

**Наукова новизна отриманих результатів.** Аналіз алгоритмів і програм розрахунку коефіцієнтів проходження хвиль через стики будівельних конструкцій. Проаналізована повніша модель поширення звуку і вібрації у будівлі, яка, в розвиток методу статистичного енергетичного аналізу, розглядає конструктивні елементи будівлі як сукупність підсистем, що мають енергію вигинистих, подовжніх і сдвигових хвиль. Врахований



обмін енергією хвиль як між підсистемами в суміжних конструкціях, так і підсистемами в тій же конструкції.

**Практичне значення отриманих результатів.** Отримані дані про динамічні властивості деяких звукоізоляційних матеріалів при дії статичних навантажень до 10 МПа, які можуть бути використані для розрахунку віброізоляції різних конструктивних вузлів.

**Особистий вклад дослідника.** Постановці мети і завдання дослідження. Збір і аналіз даних для проведення дослідження.

**Апробація результатів роботи.** Результати роботи докладалися на XXIV науково-технічної конференції студентів, магістрантів, аспірантів, молодих вчених та викладачів з доповіддю «Проблеми захисту від шуму і вібрації в цивільних будівлях» у 2019р.

**Структура і об'єм магістерської роботи.** Магістерська робота складається з вступу, чотирьох розділів, укладення, списку використаних джерел містить 116 сторінок, 24 рисунка та 4 таблиці, список використаних джерел.

# РОЗДІЛ 1

## РЕТРОСПЕКТИВНИЙ АНАЛІЗ І СУЧАСНЕ СТАН ТЕОРІЇ І МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ ПОШИРЕННЯ ЗВУКУ ВИДАННЯХ

### 1.1. Проблеми захисту від шуму і вібрації в цивільних будівлях

Проблема захисту від шуму і вібрації в житлових і громадських будівлях існує, ймовірно, з кінця XIX століття, коли почалося масове будівництво будівель, функціональна і планувальна організація яких припускала наявність у будівлі великої кількості приміщень різного призначення для значної кількості користувачів. На акустичний режим приміщень роблять вплив як зовнішні, так і внутрішні джерела шуму і вібрації, причому останні з часом ставали усе більш різноманітними і потужними. У західних країнах дослідження в області звукоізоляції будівель почалися услід за розвитком теорії звуку. Розуміння механізму поширення хвиль в конструкціях ґрунтувалося на дослідженнях коливань струн, стержнів і пластинів, виконаних в XVIII, - XIX століттях Г. Кірхгоффом, Г. Гельмгольцом, С. Пуассоном і багатьма іншими відомими ученими. Видатний вклад в створення теорії коливання балок і пластинів внесли і учені Д. Бернуллі і Л. Ейлер. Імпульсом до розвитку будівельної акустики послужили роботи Дж. В. Стрета (лорда Рэлея), а пізніше Г. Лэмба і С. П. Тимошенко.

Вже перші дослідники зв'язували процес поширення звуку з поширенням хвиль по конструкціях, що як безпосередньо розділяють приміщення, так і по суміжних, примикаючих конструкціях (структурний звук). Дослідження звукоізоляції, проведені У. Сэбином у будівлях музичної консерваторії, в приватному будинку і в Нью-йоркському інституті музичного мистецтва показали, що звукоізоляція приміщень залежить не лише від тієї, що розділяє приміщення конструкції. Його досліди вказали на важливість досліджень поширення звуку по суміжних конструкціях. За перші

30 років ХХ століття були опубліковані цілий ряд робіт Вейсбаха, У. Сэбина, Ф. Ватсона, В. Кнудсена, П. Сэбина, інших дослідників. Детальний їх опис зробив професор С. Я. Лифшиц [34], що опублікував в 1931 році, книгу, присвячену проблемам будівельної акустики. Серед описуваних їм результатів досліджень зарубіжних учених є і вітчизняні дослідження в області звукоізоляції, виконані в 1929 році в МИИТе В. Зерновим і П. Брянцевим. Усі дослідники відмічали два шляхи перенесення енергії звуку : «повітря» і «матеріальний» (по корпусу будівлі). Численні експерименти, дослідження звукоізоляції в різних побудованих будівлях дозволили виробити ряд прийомів захисту від корпусного шуму: облаштування подвійних перегородок, застосування пружних прокладень або засипок між конструктивними шарами багат шарових конструкцій, ізоляція приміщень у будівлі за принципом «коробки в коробці». Проте самі ж автори відмічали, що прийняті рішення часто не давали очікуваного результату. Непередбачуваність ефекту заходів по звукоізоляції стала стимулом дослідження процесів поширення структурного шуму.

До середини ХХ століття у будівництві використовувалися переважно стінні конструктивні схеми, а будівлі будувалися, в основному, з кам'яними стінами і балочними перекриттями. Проблема звукоізоляції виникала при поширенні звуку через полегшені перекриття і перегородки, самі ж масивні стіни мали високу звукоізолюючу здатність. Проте вже в цей час створювалися і впроваджувалися нові будівельні технології і конструктивні системи будівель, засновані на розділенні функцій конструктивних елементів, що несуть і захищають. Поєднання сталевого або залізобетонного конструктивного остову будівлі, що несе, з легкими конструкціями, що захищають, у вигляді панелей істотно ускладнило завдання звукоізоляції внаслідок поширення структурного звуку по суміжних конструкціях. Верн О. Кнудсен писав: «Очевидно, що одним з найбільш ефективних методів запобігання таким звукам в матеріалі (тобто структурного звуку - авт.) є введення розривів шляхом звуків. Ці розриви мають бути заповнені

матеріалами, що дуже відрізняються по пружності і щільності від жорстких матеріалів конструкцій... Залізобетонні і «сталеві» будівлі представляють найбільші труднощі з точки зору ізоляції таких звуків. Кам'яні і цегляні конструкції, як правило, не передають так легко звукових хвиль стискування, головним чином, внаслідок великої кількості вапняних швів, і тому значно вільніші від проникнення звуків через матеріал, чим бетонні і навіть дерев'яні конструкції» [43]. Експериментальні дослідження непрямої звукопередачі, проведені в 30-х роках Дж. Констеблем (Constable J.E.R.) [79,80], а потім на початку 50-х Е. Мейером, П. Паркином, Г. Обер-стом, Г. Пуркисом (Meuer E., Parkin P., Oberst H., Purkis H.), Ф. Эйхлером показали, що непряма звукопередача робить значний вплив на звукоізоляцію і у будівлях з традиційною конструктивною системою.

З другої половини ХХ століття масово застосовуються індустриальні методи зведення житлових і громадських будівель з використанням каркаснопанельних, великопанельних і монолітних конструктивних систем і технологій, а основним матеріалом будівель стає залізобетон, що характеризується високим модулем пружності і низьким коефіцієнтом втрат звукової енергії. Технології каркасно-панельного і великопанельного житлового будівництва, що застосовувалися в СРСР і за кордоном в 50-80 роки створили тип житла з дуже посередньою звукоізоляцією. Це відзначалося в численних вітчизняних і зарубіжних дослідженнях в області будівельної акустики, в яких виконаний аналіз впливу планувальних і конструктивних характеристик будівлі на звукоізоляцію, розроблені рекомендації для проектування. У 1977 році в СРСР, натомість мендації для проектування. У 1977 році в СРСР, замість розрізнених вимог по звукоізоляції для різних типів будівель, прийняті діючі і нині норми проектування СНиП II - 12-77 «Захист від шуму». Аналогічні правила проектування звукоізоляції прийняті в інших країнах. Принципи нормування звукоізоляції мають подвійний характер. З одного боку, нормуються гігієнічно допустимі рівні шуму і вібрації в приміщеннях різного

призначення, з іншого боку, вимоги звукоізоляції пред'являються не до конструктивної і планувальної системи будівлі, а до окремих плоских внутрішніх конструкцій, що захищають, - стін, перегородок і перекриттів. Таким чином, при проектуванні регламентується не звукоізоляція приміщень, а звукоізолююча здатність конструкцій, що захищають, розділяють два суміжні приміщення.

Звукоізоляція суміжних приміщень залежить не лише від физикомеханических властивостей конструкції, що захищає, але і від характеристики конструктивної системи будівлі, параметрів примикаючих конструкцій, по яких відбувається непряма звукопередача, а також акустичних властивостей самих приміщень. Вплив непрямой звукопередачі на звукоізоляцію суміжних приміщень у будівлях досліджували В. І. Огорож, Микільський В. Н., Лалаев Э.М., Ковригин С. Д., Лук'янович, Калюжный В. В., Крейтан В. Г., Сухов В. Н., Анжелов В. А., Осіпов А.Г. [24, 25, 26, 27, 33, 44, 45] і інші учені. Натурними дослідженнями виявлено, що залежно від співвідношення поверхневих мас і жорсткості примикаючих елементів, індекс звукоізоляції обгороджування, може зменшуватися або збільшуватися на декілька децибел, що пояснюється характером відтоку енергії звукової вібрації в суміжні конструкції і перенесенням звукової енергії обхідними шляхами. У «Керівництві за розрахунком і проектуванням звукоізоляції конструкцій будівель», що захищають, структурна звукопередача врахована поправками до звукоізоляції від - 2 до +1 дБ. Деякі зарубіжні дослідження структурної звукопередачі суттєво розсовують межі зміни звукоізоляції суміжних приміщень залежно від характеру конструктивної схеми. Л. Кремер в одній зі своїх перших робіт [109] показав, що звукоізолююча здатність одношарової панелі залежить від загального коефіцієнта втрат конструкції. Е. Геретсен (E. Gerretsen), оцінюючи загальні втрати коливальної енергії, втрати, що включають, в матеріалі панелі, втрати на звукоизлучение і втрати на поглинання примикаючими конструкціями, показав, що звукоізолююча здатність обгороджування може змінюватися до 15 дБ при

різному поєднанні параметрів втрат. Дослідження б. Зудрович (В. Szudrowicz) вказують на те, що звукоізолююча здатність конструкції, що захищає, від повітряного шуму при несприятливому поєднанні поверхневих мас перегородки і примикаючих конструкцій може змінюватися до 8 дБ.

Звукоізоляція приміщень, на відміну від звукоізолюючої здатності конструкції, є акустичною характеристикою споживчої якості будівлі. Звукоізоляція приміщень припускає забезпечення санітарних норм по рівнях шуму в приміщенні і рівнях вібрації на конструкціях, що захищають, при розміщенні джерел шуму і звукової вібрації з проектною потужністю не лише в суміжних, але і у видалених приміщеннях будівлі. Важливість такої постановки в проектуванні і нормуванні звукоізоляції усе більш актуальна, особливо для проектування багатоповерхових житлових будівель. Річ у тому, що діючий нині норми недостатньо регламентує функціональну організацію житлового будинку і ізоляцію жител від нежитлових. У відсутність чітких регламентів при будівництві нових і реконструкції старих будівель у вбудованих приміщеннях житлових будинків розміщуються цілодобові кафе, ресторани, казино і тому подібне, гаражі і стоянки особистого автотранспорту, потужні опалювальні агрегати, насоси підкочування води, системи вентиляції, різні майстерні і підприємства побутового обслуговування. Як правило, проектувальники або ігнорують заходи по звукоізоляції, або передбачають формальні рішення, що не забезпечують необхідний акустичний режим ні в суміжних, ні у видалених від джерел шуму приміщеннях. В процесі експлуатації це призводить до численних скарг громадян - користувачів жител. Аналогічні проблеми виникають і при експлуатації громадських будівель, особливо лікувальних, учбових і культурно-просвітницьких установ.

У практиці будівництва накопичений значний досвід застосування конструктивних і планувальних заходів по боротьбі з шумом в цивільних будівлях, що базується на ряду конструктивних прийомів, що дозволяють знижувати структурний шум. Вони засновані на застосуванні пружних

вставок і прокладень в сполученнях агрегатів, трубопроводів інженерного устаткування і будівельних конструкцій, в стиках несних і не несучих будівельних конструкцій, на застосуванні конструктивно виправданих віброзатримуючих елементів. Ефект захисту від структурного шуму дають додаткові обшивки на стінах і перекриттях. Ефективність застосування перерахованих заходів дуже обмежена, з одного боку, в силу великої маси конструктивних елементів будівель, а з іншого боку, економічною і технологічною доцільністю.

Системні принципи рішення завдань звуко- і віброізоляції істотно розвиненіші в суміжних галузях, наприклад, в суднобудуванні і авіабудуванні [1]. Тут завдання звуко- віброізоляції значно складніше внаслідок великої потужності силових агрегатів, насиченості об'єктів проектування інженерними системами і обмеження загальної маси об'єкту в цілому і маси окремих конструкцій, що захищають.

Никифоров А.С. сформулював 3 головні принципи акустичного проектування об'єктів (кораблів, верстатів, технологічних ліній) :

1. Вибір акустично раціональної архітектури або акустичного вигляду, максимально можливе видалення джерел шуму від місць розміщення людей, що збільшує загасання енергії вібрації на шляхах поширення і екранування джерел шуму елементами, що несуть.
2. Поліпшення власних віброакустичних характеристик конструкцій, яких належать віброзбудливість, вібропровідність, звукоізлучаюча здатність і звукоізоляція конструкції.
3. Комплексність проектних рішень, спрямована на забезпечення максимального ефекту від використання засобів боротьби з шумом і вібрацією.

Будівлі, на відміну від транспортних апаратів і технологічних пристроїв, характеризуються меншим обмеженням конструкцій по масі і більше дисперсним розподілом джерел шуму і вібрації. Тому принципи А.С. Никифорова стосовно будівель мають свої особливості.

Перший принцип припускає функціональне зонування будівлі, блокування приміщень з джерелами шуму і вібрації і видалення від них «тихих» приміщень, введення між ними буферних зон (наприклад, технічних поверхів). Як і для кораблів, вдале планування будівлі, ймовірно, може дати акустичний ефект до 10-20 дБ і більше.

Реалізація другого принципу, заснованого на поліпшенні власних віброакустичних характеристик конструкцій будівлі, повністю залежить від вибраної проектувальником конструктивної схеми (схеми розподілу навантажень), конструкційних матеріалів, технології строительномонтажних і обробних робіт. Традиційні будівельні системи припускають використання масивних несних і одночасно захищаючих конструкцій, нижчі власні частоти вигинистих коливань яких знаходяться в області менше 50 Гц, а критичні частоти нижче 200 Гц. В результаті, віброзбудливість, визначувана механічною податливістю ( $Y = \xi F$ , де  $\xi$  - коливальна швидкість в точці збудження,  $F$  - збудлива поперечна сила), практично вже з низьких нормованих у будівельній акустиці смуг частот наближається до віброзбудливості нескінченної пластини, тобто практично не залежить від внутрішніх втрат в матеріалі і, в рівній мірі, залежить від маси  $m$  і жорсткості  $B$  в конструкції  $Y = (8\sqrt{mB})^{-1}$ . Легкі конструкції, що захищають, і обробні листові матеріали, широко вживані в останні десятиліття, навпаки, на низьких частотах мають високу віброзбудливість, яку можна понизити збільшенням внутрішніх втрат за рахунок вібропоглинання і збільшенням жорсткості за рахунок підкріплюючого каркаса.

Звукоізлучаюча здатність конструкції, що захищає, визначається коефіцієнтом випромінювання  $\sigma = R_{rad} / p_o c_o$ , де  $R_{rad}$  - опір випромінювання пластини,  $p_o c_o$  - акустичний опір середовища. Для масивних панелей стін і перекриттів на частотах вище критичною коефіцієнт випромінювання  $\sigma \approx 1$ , а критична частота доводиться на нижчі нормовані смуги частот. Для легких панелей і обшивок випромінювана ними в області низьких і середніх частот звукова потужність визначається віброзбудливістю і коефіцієнтом



випромінювання, тобто також жорсткістю конструкції і коефіцієнтом втрат матеріалу. Регулювати звукоізлучение в цій частотній області можна, збільшуючи жорсткість панелі ребрами жорсткості або збільшуючи втрати, наклеюючи на конструкції вібропоглинаючий шар.

Вібропровідність визначається конструктивною системою будівлі. Оскільки конструкційні будівельні матеріали характеризуються малим коефіцієнтом внутрішніх втрат (до 0,01), а застосування вібропоглинаючих матеріалів у будівництві ускладнене великою вагою конструкцій, то вібропровідність будівлі повністю залежить від віброізолюючої здатності стиків елементів, що несуть і захищають. Зміна віброізолюючої здатності окремих стиків конструкцій призводить до перерозподілу енергії звукової вібрації, а загальна її кількість у будівлі не змінюється. Це означає, що, збільшення віброізоляції стику конструкцій в одному напрямі призводить до того, що енергія структурного звуку спрямовується в інші конструкції, знижуючи цим звукоізоляцію інших суміжних і видалених приміщень. Цей ефект наочно показаний в роботах S. Ljunggren. Експериментальними дослідженнями виявлено: в каркасній будівлі із залізобетонним перекриттям і легкими перегородками (каркас + обшивка) звукоізолююча здатність легких перегородок істотно вища за розрахункову, що пояснюється відтоком звукової енергії по перекриттю. Рівні віброшвидкості на конструкціях, що захищають приміщення з джерелом, в такій будівлі на 3-8 дБ менше, ніж у будівлі з традиційною перехресно-стінною конструктивною системою. Це свідчить про те, що енергія структурного шуму по перекриттю йде у видалені приміщення.

Вібропровідність стиків конструкцій істотно залежить від матеріалу, що заповнює стик. Колони або ригелі в стиках каркаснопанельного будівлі слід розглядати як віброзатримуючі маси [97]. Заповнення стику м'якшими, ніж бетон і будівельний розчин, матеріалами дозволяє їх розглядати як стики з прокладеннями [2, 57]. Прокладення в стиках будівельних панелей можуть збільшити віброізоляцію стику в порівнянні з жорстким стиком, від

декількох децибел до десятків децибел, що залежить і від матеріалу прокладення і від статичного навантаження на неї [96]. Проте, застосування прокладень в стиках несних конструкцій дає досить обмежений ефект звукоізоляції приміщень, причому тільки у напрямі поширення структурного шуму, в якому прокладення працюють як віброізолятор. Цей ефект експериментально досліджений в лабораторних і натурних умовах Р. Крайком і А.Г. Осіповим [98, 99], які також відмічають перерозподіл енергії вібрації між конструкціями, зв'язаними в стику з прокладенням. Окрім цього, вони звертають увагу на перетворення хвиль трьох типів, тому ефект прокладення слід оцінювати з урахуванням проходження не лише вигинистих, але і подовжніх і сдвигових хвиль через стик.

Очевидна суперечність власних віброакустичних характеристик окремих конструктивних елементів будівлі, характеристик їх вузлів, а також вплив об'ємно-планувальних рішень будівлі і акустичних характеристик приміщень на поширення звуку у будівлі, призводять до необхідності використати принципи оптимізації у рамках будівельно-акустичного проектування будівлі. При цьому будівлю слід розглядати як цілісну систему, що складається з безлічі пов'язаних підсистем, кожна з яких характеризується власними акустичними характеристиками. Зв'язки між підсистемами описуються параметрами проходження хвиль, а кожна з підсистем в загальному випадку може бути навантажена джерелом звуку або вібрації. Таким чином, третій принцип акустичного проектування А.С. Никифорова (принцип оптимізації) може бути реалізований на основі віброакустичного розрахунку будівлі в цілому або його значного фрагмента.

Методологія проектування звукоізоляції в цивільних будівлях повинна трансформуватися так, щоб розрахунки звуко-віброізолюючої здатності окремих конструкцій і конструктивних вузлів розглядалися як приватні завдання віброакустичного розрахунку будівлі в цілому або його планувальних вузлів при заданих характеристиках проєктованих і потенційних джерел шуму і вібрації. Формалізація громіздких математичних

процедур віброакустичного розрахунку будівлі у вигляді призначеної для користувача комп'ютерної системи розрахунку дозволяє полегшити роботу архітекторів і інженерів-проектувальників, зробити доступною сучасні технології віброакустичного проектування будівель.

## **1.2. Методи розрахунку поширення звуку у будівлях**

Вибір методу розрахунку будь-якого об'єкту визначається станом теорії, що обґрунтовує ту або іншу розрахункову модель, і оптимальним співвідношенням об'єму обчислень і точності методу. У акустиці приміщень склалися взаємно доповнюючі один одного методи, засновані на хвилевій, статистичній і геометричній теоріях, а у віброакустиці будівель отримали розвиток і існують, доповнюючи один одного, хвилева і енергетична теоретичні моделі поширення енергії звуку і вібрації. Призначення енергетичної моделі полягає в постановці загального завдання розподілу звукової енергії в розрахунковій системі в цілому, а хвилева теорія дає рішення ряду приватних завдань, таких як власні коливання, загасання енергії хвиль в межах розрахункових підсистем, проходження хвиль з однієї підсистеми в іншу, поглинання і випромінювання звукової енергії.

Хвилева теорія розглядає процес коливань в системах з розподіленими параметрами маси і жорсткості. Характер хвилевого руху часток середовища описується хвилевими рівняннями, що є рівняннями рівноваги інерційних і пружних сил в системі з розподіленими параметрами маси і жорсткості. На відміну від нескінченних середовищ, де поширюються об'ємні хвилі розширення і зрушення [32, 55], у будівельних конструкціях на характер коливань роблять вплив межі твердого тіла. Симетричні і антисиметричні форми коливань часток конструкції відносно нейтральної осі або площини конструкції, що поєднують в собі деформації зрушення, розтягування, - стискування і вигину, розглядаються як 4 сімейства хвиль. Елементарна теорія хвиль, розроблена Д. Бернуллі і Л. Ейлером, в постановці хвилевого

рівняння розглядає один з видів деформацій. Така хвилева модель припускає, що в стержнях і пластинах можуть поширюватися сдвигові хвилі, хвилі чистого вигину і квазіподовжні хвилі. На початку ХХ століття теорія поширення подовжніх хвиль в конструкціях істотно переглядалася Рэлеєм і Р. Бішопом (R.E.D. Bishop). Подовжня хвиля у балках розглядалася як сукупність подовжніх і сдвигових деформацій. Релей, а потім С. П. Тимошенко при складанні хвильового рівняння для вигинистих хвиль врахували інерцію обертання поперечного перерізу і деформацію зрушення. У 50 роках Р. Миндлином (R.D. Mindlin) розроблена загальніша модель поширення вигинистих хвиль з урахуванням сукупності можливих деформацій в товстих пластинах. Теоретичні дослідження хвильового руху в так званих «товстих» балках і плитах переслідували мету уточнити параметри хвильового руху на досить високих частотах, коли висота перерізу конструкції порівнянна з довжиною сдвигової хвилі. Аналіз ряду наближених моделей дисперсії вигинистих і подовжніх хвиль порівняно з точним рішенням рівняння Рэлея - Лэмба досить детально описаний в книзі І.І. Артоболевского, Ю.І. Бобровниченко і М.Д. Генкина [6].

Процес поширення хвиль описується амплітудами зміщень часток або перерізів конструкції, швидкістю поширення фази коливань (фазова швидкість  $c$ ) і швидкістю поширення енергії хвилі (групова швидкість  $C$ ). Хвилеве рішення завдань поширення енергії хвиль через перешкоду досить просто знаходиться, якщо дані об'єкти мають нескінченні розміри. В цьому випадку в них поширюються хвилі, що біжать. Картина стоячих хвиль у збуджуваному напівнескінченному середовищі або конструкції також описується дуже просто.

З використанням хвилевої теорії перше рішення задачі про звукоізоляцію ізотропної нескінченної пластини, що розділяє два напівнескінченні простори, отримане Р. Бергером (R. Berger) в 1911 році. У 1942 році це завдання вирішене Л. Кремером [109], але в розрахунку похилого проходження хвилі через тонку нескінченну пластину врахований

ефект хвильового збігу, що призводить до резонансного збудження вигинистих коливань пластини :

$$\tau_{\theta} = \left| 1 + j \left( \frac{\omega m \cos \theta}{2 \rho_o c_o} \right) \left( 1 - \frac{k_o^4}{k_b^4} \sin^4 \theta \right) \right|^{-2}, \quad (1.1)$$

де  $\theta$  кут падіння хвилі на пластини;

$\omega$  - циклічна частота коливань;

$m$  - поверхнева маса пластини;

$k_o$  - хвильове число подовжніх хвиль в повітрі;

$k_b$  - хвильове число вигинистих хвиль в пластині;

$\rho_o$  - щільність повітря;

$c_o$  - швидкість поширення звуку в повітрі.

З цього виразу очевидна умова повного проходження звуку :

$$k_b = k_o \sin \theta \quad \text{чи} \quad c_b = \frac{c_o}{\sin \theta} \quad (1.2)$$

де  $c_b$  - фазова швидкість поширення вигинистих хвиль в пластині.

Умова хвильового збігу має місце на частоті  $f_c$ , що називається критичною частотою або частотою хвильового збігу, визначуваною з урахуванням кута падіння :

$$f_c = \frac{\sqrt{3}}{\pi c_l h} \cdot \frac{c_o^2}{\sin^2 \theta}, \quad (1.3)$$

где  $c_l$  - скорость продольных волн в пластине;

$h$  - товщина пластини.

На критичній частоті звукоізоляція залежить від внутрішніх втрат в пластині, які враховуються представленням вигинистої жорсткості пластини в комплексному виді  $B = B(1 + jn)$ , де  $n$  - коефіцієнт втрат матеріалу пластини при поширенні вигинистих хвиль.

Рішення Л. Кремера використали А. Лондон (A. London) і Л. Беранек (L. Beranek)[56,57], застосовуючи хвильову теорію для розрахунку похилого і

дифузного проходження звуку через нескінченну одношарову або двошарову пластину. Моделювання дифузного (рівноімовірного під будь-яким кутом нахилу) падіння робиться умовами інтеграції коефіцієнта проходження по куту падіння. В. І. Огорож [25, 27], розвиваючи хвильову теорію проходження звуку через одно- або двошарову пластину, показав, що точнішими є межі інтеграції від 0 до  $78^\circ$ .

Дослідження власних коливань конструкцій і подальші дослідження процесу випромінювання звуку прямокутною пластиною Г. Майдаником привели до необхідності обліку кінцівки розмірів пластини в розрахунках звукоізоляції. У пластині, збуджуваною поперечною силою або моментом, виникають вигинисті хвилі, які, відбиваючись від країв пластини, утворюють поле стоячих хвиль. Форми власних коливань конструкції називаються модами. У загальному випадку, дія з будь-якою частотою призводить до збудження усіх мод конструкції, проте лише ті моди, які потрапляють в частотну область дії зовнішньої сили, є резонансними [112].

Наступним кроком розвитку хвильової теорії звукоізоляції стало рішення для прямокутної пластини, поміщеної в жорсткий екран і розділяючої два напівпростори [60,61]. Цей же підхід був використаний для розрахунку подвійної перегородки [114]. Завдання про коливання прямокутної пластини в заданому середовищі розглянуте в роботі [289]. Тут дається рішення для випромінюваної звукової потужності при збудженні пластини поперечною силою.

Розгляд мод коливань в прямокутній пластині дозволив переглянути ефект хвильового збігу. Bhattacharya M.C., Guy R.W., Crocker M.J. [60, 61] показали, що при випромінюванні звуку пластиною в ревербераційне приміщення значення частоти хвильового збігу пластини не залежить від кута падіння :

$$f_c = \frac{\sqrt{3} \cdot c_0^2}{\pi c_1 h} \quad (1.4)$$

Перелічені вище роботи послужили основою розвитку нового напрямку

хвилевої теорії, який називають модальним аналізом. Методологія модального аналізу розглядає процес передачі енергії хвиль з однієї підсистеми в іншу або третю як процес освіти і взаємодії мод коливань в підсистемах. Так, завдання звукоізоляції двох суміжних приміщень, розділених перегородкою, може бути поставлене як взаємодія тривимірних полів хвиль в приміщеннях і двомірного поля вигинистих хвиль в перегородці. Аналітичне рішення задачі про збудження і передачу звуку з прямокутного приміщення в прямокутну пластину і випромінювання пластини в суміжне приміщення знаходиться на основі обліку вкладу кожної моди. Значно раніше за зарубіжних колег таке рішення було запропоноване М.С. Седовим, який для спрощення аналітичного рішення розглянув проекцію хвилевого поля в приміщенні на перегородку, скоротивши процедури узгодження хвилевих полів і звівши розрахунок до плоского завдання [110].

При рішенні задачі про звукоізоляцію перегородки, що розділяє два приміщення, опис процесу йде в параметрах звукового тиску в кожній точці приміщення, представлених через власні функції приміщення, і коливальній швидкості в кожній точці пластини через її власні функції коливань. Проте великий об'єм обчислень обмежує частотний діапазон аналітичних рішень досить низькими частотами. Так для розмірів реальних приміщень будівель, цей діапазон обмежується на сьогодні областю низьких і середніх частот, що визначається комп'ютерними можливостями. На низьких частотах на звукоізоляцію роблять вплив не лише розміри і звукопоглинання в приміщеннях, але і розміри і пропорції перегородки і навіть місце розташування джерела звуку. Одна з останніх робіт, що використовують методологію модального аналізу для розрахунку звукоізоляції двох прямокутних приміщень, розділених перегородкою (Osipov A., Mees P., Vermeir G.), присвячена розрахунку цегляної перегородки і прямокутної скляної пластини на частотах до 200 Гц. У постановці завдання використовується допущення, що стінки приміщень, окрім перегородки,

абсолютно жорсткі. Невідомі амплітуди поперечних коливань пластини і звукові тиски в приміщеннях визначаються з рішення хвильових рівнянь з граничними умовами, що зв'язують сили і зміщення в звукових полях в приміщеннях і на поверхнях пластини.

Методологія модального аналізу знаходить застосування і має перспективу розвитку в методах активної звукоізоляції. Цикл статей Pan J., Hansen C. H. присвячений методам активної звукоізоляції, заснованим на модальному аналізі. У них досліджені хвильові функції прямокутного приміщення і прямокутною вільно опертою пластинки, представлено аналітичне рішення про взаємодію прямокутного об'єму і прямокутної панелі. Стосовно прямокутного об'єму, розміром  $1,0 \times 1,15 \times 0,868$  м<sup>3</sup> і пластині, що закриває його, отримане аналітичне рішення на частотах до 250 Гц. У роботі Jo S. H., Elliot S.J. описано рішення для активної звукоізоляції двох прямокутних об'ємів з розмірами  $7 \times 5 \times 3$  м<sup>3</sup>, розділених прямокутною стіною  $5 \times 3$  м<sup>2</sup>, поверхневою масою 292 кг/м<sup>2</sup>. Внаслідок великих розмірів приміщень область комп'ютерних можливостей розрахунку обмежена 100 Гц. Показана можливість за допомогою вторинного джерела звуку, що розміщується в приміщенні з основним джерелом або в приймальному приміщенні, отримати ефект зниження рівнів шуму до 40 дБ.

Хвильова теорія дозволяє знайти рішення і для завдання про проходження хвиль через стики будівельних конструкцій. Перше рішення про проходження вигинистої хвилі при нормальному падінні через стик напівнескінченних тонких пластинів опубліковане Л.М. Бреховских в 1944 році [12]. Принцип рішення заснований на складанні рівнянь поперечних зміщень вигинистих хвиль, що біжать, у вигляді показової функції. В результаті підсумовування амплітуд що падає і відбитої хвиль у збуджуваній пластині виникає стояча хвиля. Для нескінченної пластини, на якій лежить нескінченний брус, Л.М. Бреховских записав граничні умови, що є рівняннями балансу сил, моментів і нерозривності зміщень і кутів повороту. Підстановка функцій зміщень в рівняння граничних умов приводить



завдання про проходження вигинистої хвилі до контактного завдання теорії пружності. Коефіцієнти проходження, виражені через амплітуди і енергії вигинистих хвиль, визначені з рішення системи лінійних рівнянь алгебри.

Цей принцип рішення задачі про проходження хвиль через стики будівельних конструкцій використаний згодом багатьма дослідниками. З розвитком теорії проходження хвиль досліджені питання проходження і перетворення хвиль в стиках, розглянуті стики різної конфігурації і заповнення. Рішення задачі для стиків напівнескінченних конструкцій (стержнів і пластинів) дає власні характеристики віброізоляції стику, корисні для використання в рішенні загальнішої задачі про поширення звуку і вібрації у будівлі в енергетичній постановці.

М. Хекл запропонував рішення для нескінченної смуги шириною  $L$ , підкріпленою балкою тієї ж довжини. Для стоячої вигинистої хвилі по ширині смуги, М. Хекл записав функцію поперечної швидкості за перешкодою як

$$v_+ = \sum_n a_n e^{-ik_n x} \sin \frac{n\pi y}{L}, \quad 1.5$$

де  $a_n$  - амплітуда  $n$  моди;

$k_n$  - хвилеве число вигинистих хвиль.

Використовуючи функції поперечної швидкості виду (1.5), М. Хекл отримав рішення відносно коефіцієнтів проходження і відображення вигинистих хвиль для пластини, підкріпленої балкою. Опис стоячих хвиль у балках кінцевої довжини ліг в основу рішення про проходження вигинистих хвиль по стержневих ґратах. У статті Bhattacharya M.C., Mulholland K.A., Crocker M.J. [145] знайдено рішення про проходження вигинистої хвилі між двома паралельними пластинами, сполученими поперечною пластиною або стержнем. Рішення шукається при нормальному падінні хвилі на стик. Для кожного з 5 пластинів записані функції подовжніх і поперечних зміщень, причому в середній пластині картина стоячих хвиль описується парою хвиль, що біжать один назустріч одному. Далі записані 9 рівнянь граничних умов

для лівого і правого сполучень пластинів зі вставкою, вони перетворені в систему 10 рівнянь відносно невідомих коефіцієнтів проходження вигинистих хвиль.

Розгляд стоячих хвиль у балках або пластинах-вставках між напівнескінченними конструкціями став основою застосування методу модального аналізу для стиків конструкцій кінцевих розмірів. Такий підхід дозволяє визначити безпосередньо стосунки енергій між пов'язаними балками або пластинами, коли одна з них збуджується поперечною силою або моментом. Метод розрахунку потоку енергії між пластинами кінцевих розмірів на основі модального аналізу, ймовірно, уперше розглянутий в роботі Guyader J.L., Boisson C., Lesueur Z. Shen Y. і Gibbs B. M. розглянули завдання про проходження вигинистих хвиль через стики прямокутних тонких пластинів, у яких задані довільні умови того, що спирається край, перпендикулярних лінії стику.

У статтях Farag N.H., Pan J. розглянуті не лише вигинисті, але і подовжні і сдвигові коливання в площині прямокутної пластини з різними умовами закріплення, і дані рівняння власних функцій подовжніх і поперечних коливань в умовах, коли моди подовжніх і поперечних коливань прямокутної пластини пов'язані.

Метод модального аналізу використаний Cuschieri J.M. [115] для розрахунку проходження вигинистих хвиль через L - образний стик прямокутних пластинів. Це ж завдання ним і McCollum M.D. вирішена для стику товстих пластинів з використанням теорії Р. Миндлина. У останній опублікованій роботі Cuschieri J.M., McCollum M.D. [116] автори розвивають метод модального аналізу з урахуванням подовжніх і сдвигових хвиль в площині панелі, досліджуючи вклад цих типів хвиль і перевіряючи гіпотезу Р. Лайона. Автори запропонували метод розрахунку проходження енергії хвиль трьох типів з використанням параметрів рухливості (віброзбудливості) конструкцій. Розрахунковий об'єкт складався з двох сполучених жорстко під прямим кутом панелей, одна з яких збуджена

поперечною силою.

У роботі показано, що хвилі в площині (подовжні і сдвигові) практично не беруть участь в передачі енергії вібрації на низьких частотах, коли виконується умова  $k_b h \leq 0,16$ . Але на високих частотах, коли  $k_b h \geq 0,1$ , хвилі в площині переносять переважаючу частину енергії. Для кожної панелі записані входні і передатні функції рухливості, окрім цього записуються рівняння потоку енергії між підсистемами. Для кутового стику виходить система з 9 рівнянь, складених за граничними умовами для пластинів. На основі вчислених параметрів рухливості складається система рівнянь відносно швидкостей коливань по усіх напрямках координат і кутової швидкості, де вільними членами є сили і моменти, вчислені по  $N$  модам в пластині. Представлені результати розрахунку стику в області частот коли  $0,16 \leq k_b h \leq 1,6$ . Розрахунок виконувався на основі елементарної теорії Бернуллі-Ейлера і на основі теорії Р. Миндлина для товстих пластинів. Автори показали, що розрахунок проходження звуку через стик з обліком тільки чисто вигинистих хвиль некоректний, оскільки ігнорує зворотні потоки енергії у вигляді хвиль в площині панелей.

У 90-х роках Mees P., Vermeir G. використали принцип М. Хекла для вирішення завдання про проходження вібрації між сполученими пластинами, заснований на записі функції поперечних зміщень (1.5). Таке рішення автори назвали «полу-модальним» або «полу-аналитическим» і запропонували його використати разом з рішенням енергетичним методом - методом статистичного енергетичного аналізу (СЕА). Вони представили результати експерименту на Т-подібному стику пластинів з полівінілхлориду з силіконовими і поліуретановими прокладеннями і зіставили своє рішення з результатами розрахунку за методикою для напівнескінчених пластинів і СЕА. У подальших роботах Bosmans I., Mees P., Vermeir G. [64], а також Bosmans I., Vermer G. [67,68], автори назвали цей метод методом полу-модальної суперпозиції (semi - modal superposition - SMS). Показано, що в області низьких частот запропонований метод забезпечує хорошу точність

розрахунку перепадів енергії вібрації на пов'язаних пластинах.

Закінчуючи огляд застосування хвилевої теорії до розрахунків поширення структурного звуку, ще раз відмітимо, що розгляд процесу поширення хвиль через сполучення напівнескінчених підсистем (повітряне середовище, балка, пластина) дозволяє визначити власні характеристики проходження і відображення хвиль через перешкоду, не залежні від ряду інших властивостей зв'язаних підсистем, таких як їх власні частоти і моди коливань і загальні втрати. Метод модального аналізу дозволяє знайти безпосередньо параметри обміну енергією, такі як перепад усереднених рівнів звукового тиску в суміжних приміщеннях, перепад усереднених рівнів віброприскорення на жорстко пов'язаних конструктивних елементах. Застосування методу модального аналізу, що оцінює вклад кожної резонансної моди коливань, вимагає значного об'єму обчислень, тому сфера застосування модального аналізу для розрахунків звуко-віброізоляції обмежується досить низькими частотами (до 200 Гц).

Разом з аналітичними методами, в останні десятиліття отримали розвиток чисельні методи віброакустичного розрахунку : метод кінцевих різниць (МКР), метод кінцевих елементів (МКЕ) і метод граничних елементів (МГЕ). Чисельні методи дозволяють моделювати напружено-деформований стан і визначати інтенсивність хвиль як твір матриць тензора напруги і вектору швидкості.

G. Ravic використав метод кінцевих різниць для визначення компонент інтенсивності вигинистих хвиль в пластині по значеннях поперечних зміщень в декількох побудованих в кінечно-різницеву схему точках. Для одновимірної або двовимірної завдань приймаються різні схеми

розміщення вібродатчиків і різне число точок виміру. Для балки потрібно як мінімум 2 точки виміру, для пластини 8 точок. Застосування методу кінцевих різниць для вирішення завдання випромінювання балки, що вигинисто коливається, в повітряний об'єм описане в роботі. Відзначається, що пов'язані підсистеми мають інші власні форми коливань, ніж окремі

елементи.

У основі методу кінцевих елементів лежить розбиття об'єкту на об'ємні вузлові осередки з подальшою побудовою системи рівнянь. Рівняння Гельмгольца для повітряного об'єму отримує вид системи рівнянь :

$$[K]\{p\} + [M]\{\ddot{p}\} = -\rho[C]\{\ddot{v}\} \quad (1.6)$$

де [K] - матриця жорсткості;

[M] - матриця маси;

[C] - матриця демпфування.

Представлені теоретичні основи МКЕ стосовно повітряного середовища, балок і воздуховодам. Метод кінцевих елементів використаний для аналізу власних коливань непрямокутного ревербераційного приміщення. Метод кінцевих елементів використаний Pietrzyk A., Kropp W., Kihlman T. для розрахунку низькочастотної звукоізоляції перегородки, як альтернатива методу модального аналізу. Для розрахунку методом кінцевих елементів використовуються програмні пакети ABAQUS, ANSYS, SYSNOISE. Метод кінцевих елементів використаний і для розрахунку проходження хвиль через стики конструкцій. У роботі [120] знаходиться рішення для з'єднання двох балок. Завдання проходження енергії вібрації через стик балок з пружною гумовою вставкою вирішене методом МКЭ. МКЭ використовувався у віброакустичних розрахунках складних систем, таких як кабіна автомобіля. Метод кінцевих елементів базується на двох методиках: прямому розрахунку через перетворення матриці жорсткості і методиці модальної суперпозиції.

Метод граничних елементів використовує плоскі вузлові осередки на межі об'єкту і спирається на теорію коллокації або варіаційну теорію. Чисельні методи мають сферу застосування для віброакустичних розрахунків на досить низьких частотах (до 200 Гц), оскільки розширення частотного діапазону в область середніх частот вимагає прогресуючого збільшення числа розрахункових елементів і, відповідно, об'єму комп'ютерних

обчислень.

Енергетичні методи розрахунку структурного шуму мають на меті побудова загальнішої моделі поширення звуку у будівлі, розглядаючи його як систему, що має значне число розрахункових елементів (підсистем) : приміщень, конструкцій. Енергетичні методи склалися по двох напрямках. Перший напрям заснований на спрощеному розгляді енергетичного обміну між підсистемами в параметрах потоку енергії, тому цей метод в літературі називається поточноенергетическим методом (Power flow analysis). Спрощений метод розрахунку поширення структурного звуку не розглядає хвилеві процеси в конструкціях і приміщеннях і спирається на прості хвилеві рішення у визначенні функцій проходження енергії через сполучення елементів, демпфування, звукоізлучення.

Основи потоково-енергетичного методу (ПЕМ) закладені в статті В. Вестфалю (Westphal W.), опублікованій в 1957 році. Другий напрям, що називається статистичним енергетичним аналізом (Statistical energy analysis), спирається на положення хвилевої теорії і враховує хвилеві процеси, що відбуваються в конструкціях і приміщеннях. Основне допущення методу статистичного енергетичного аналізу (СЕА) полягає в ігноруванні когерентності хвиль, що біжать і відбитих. СЕА використовує принципи статистичної механіки, вважаючи, що енергія коливань рівномірно розподілена в підсистемі, тобто кожна мода коливань має однакову кількість енергії в межах даної смуги частот. Метод СЕА також спирається на теоретичні принципи В. Вестфалю стосовно енергообміну між підсистемами і до побудови балансу енергії в системі в цілому. Основи методу СЕА закладені в роботі Р. Лайона, (Lyon R.H.) і Г. Майданика (Maidanik G.), опублікованою в 1962 році.

Метод СЕА займає проміжне положення між методом модального аналізу і потоково-енергетичним методом. Як і метод модального аналізу, СЕА розглядає поля хвиль в приміщеннях і конструкціях з позицій їх власних коливань. Проте, в реальних конструкціях і приміщеннях фронти

хвиль, що поширюються від джерела і відбитих від меж і перешкод, є когерентними і тому амплітуди хвиль складаються. Модальний аналіз розглядає суперпозицію когерентних мод, при цьому кожна мода привносить свій вклад до амплітуди коливань системи. Метод СЕА допускає, що в підсистемах будівлі, починаючи з частот, коли в даній смузі частот є достатнє число мод, прямі поля не грають істотної ролі в розподілі енергії, тобто хвилеве поле, що склалося, може вважатися дифузним. Ця умова виконується вже на досить низьких частотах, що дозволяє перейти від модального аналізу до енергетичної моделі, що представляє усереднений розподіл енергії в даній підсистемі. Статистичні принципи методу дозволяють вважати, що кількість енергії в підсистемах пропорційна кількості мод коливань в даній смузі частот. Загальні стани і принципові відмінності в методах модального аналізу, статистичного енергетичного аналізу і потоково-енергетичного методу викладені в роботі Р. Лайона.

Потоково-енергетичний метод отримав досить широке поширення, як в Україні, так і за кордоном в силу доступності його використання для вирішення деяких інженерних завдань розрахунку звукоізоляції з урахуванням структурної звукопередачі. Його застосування дозволяє з достатньою точністю виявити вплив непрямой звукопередачі в розрахунку звукоізоляції суміжних приміщень, а також визначати звукоізолюючу здатність конструкцій, що захищають, з урахуванням відтоку звукової енергії в суміжні конструкції. Простота теоретичної моделі дозволяє використати цей метод в інженерних розрахунках і не вимагає використання потужної обчислювальної техніки.

Принципові рішення завдань об віброізоляції з'єднань стержневих конструкцій, опубліковані Л. Кремером в 1953 р. [110], орієнтували В. Вестфалья на розробку енергетичної моделі поширення структурного звуку в конструктивному остові безкаркасної будівлі. В. Вестфаль розглянув будівлю як цілісну конструктивну систему, елементи якої (стіни, перекриття) пов'язані в стиках конструкцій. Вважаючи, що найбільший вклад у

випромінювання звуку вносять вигинисті хвилі, що поширюються по конструкціях, він нехтував впливом хвиль інших типів. В. Вестфаль ввів поняття коефіцієнтів зв'язку конструкцій при проходженні через їх стики енергії вигинистих хвиль.

Цей принцип покладений в теорію В. І. Заборова [24 - 27].

Розглядаючи два суміжні приміщення в структурі будівлі (рис. 1.1.), в одному з яких знаходиться джерело повітряного шуму, В. І. Огородж вказав на 4 основні шляхи передачі звуку в суміжне приміщення:

1. - пряма звукопередача через перегородку 1;
2. - структурна звукопередача в результаті збудження тих, що захищають конструкцій приміщення з джерелом і передачі енергії вібрації в перегородку 1;
3. - структурна звукопередача в результаті збудження тих, що захищають конструкцій приміщення з джерелом і передачі енергії вібрації в конструкції суміжного приміщення, що захищають;
4. - структурна звукопередача в результаті збудження перегородки 1 і передачі енергії вібрації в конструкції суміжного приміщення, що захищають.

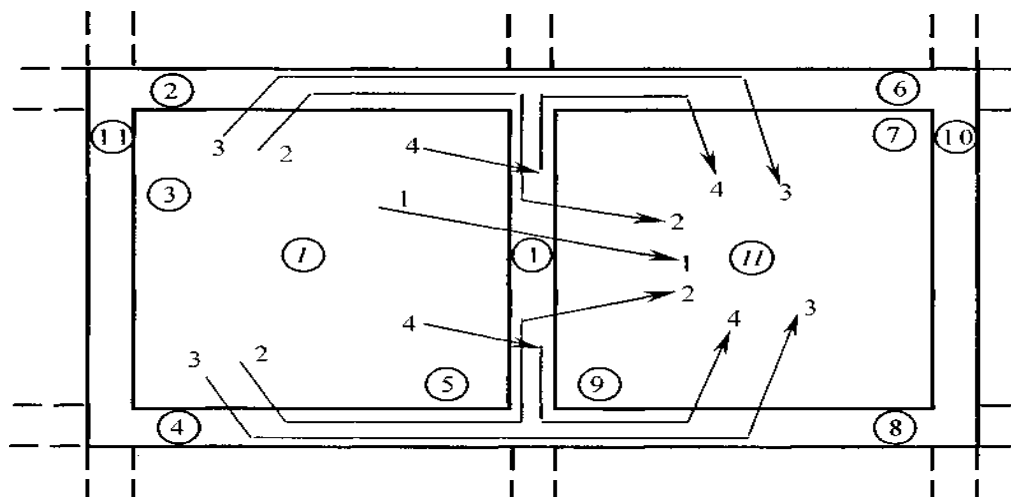


Рисунок 1.1 - Схема поширення структурного шуму

Вважаючи, що енергія звукової вібрації в панелях 10 і 11 дуже ослаблена декількома переходами через стики, В. І. Огородж виключив їх участь в енергетичному обміні, як і інші конструкції (позначені на малюнку



штриховими лініями), що примикають до даного фрагмента. Таким чином, окрім перегородки  $\Gamma$  в схемі розглянуті конструкції  $i = 2...5$ , що захищають приміщення з джерелом, і конструкції  $j = 6...9$ , що захищають суміжне приміщення, що ізолюється. Підсумовуючи усі шляхи передачі звуку, автор записав загальну звукову потужність, що випромінюється в приміщення II, що ізолюється :

$$P_u = P_{u1} + \sum_{j=6}^9 P_{uj}, \quad (1.7)$$

де  $P_{u1}$  - потужність, що випромінюється перегородкою 1;

$P_{uj}$  - потужності, що випромінюються 6...9 панелями, що захищають суміжне приміщення.

У одній з останніх робіт В. Г. Крейтана [53] пропонується інженерна методика розрахунку звукоізоляції сусідніх приміщень при повітряному і ударному збудженні. Звукоізоляція повітряного шуму або приведений рівень ударного шуму отримані як арифметична сума енергетичного вкладу по кожному з можливих шляхів проходження звуку. Методика В. Г. Крейтана дозволяє оцінити також шум, викликаний роботою ліфта, якщо відомий рівень віброшвидкості на конструкції, безпосередньо пов'язаній з устаткуванням. Ця методика є найбільш адаптованою до розрахунку різних завдань будівельної акустики будівель серед інших спрощених енергетичних методик і може бути використана для прогнозу звукоізоляції у будівлях при проектуванні.

Серед зарубіжних робіт, присвячених розвитку і використанню потоково-енергетичного методу, слід зазначити роботу S. Ingemanson, що використало методологію В. І. Заборова. Звукоізоляція одношарової конструкції їм також представлена як процес звукопередачі прямим і трьома непрямыми шляхами. Ймовірно, найбільша кількість робіт, присвячених розрахунку звукоізоляції з використанням потоково-енергетичного методу, належить Е. Gerretsen. У статті Е. Gerretsen аналізує шляхи передачі звуку

через акустично однорідну конструкцію з урахуванням структурної звукопередачі. Автор вирішує задачу поширення звуку через перегородку з урахуванням непрямой структурною звукопередачі. При цьому аналіз шляхів поширення звуку він робить по описаній вище енергетичній моделі, до якої приходять шляхом спрощення схеми енергетичних потоків по СЕА. Для оцінки прямої звукопередачі через однорідну одношарову конструкцію автор використовує формули R. Josse і С. Lamure. У подальших роботах Е. Gerretsen приходять до використання спрощеної схеми поширення звуку, аналогічній схемі В. І. Заборова (рис. 1.1), використовує схожі апроксимації і, зрештою, пропонує прості формули розрахунку, в які підставлені значення звукоізоляції тієї, що розділяє і суміжних конструкцій. Останні, у свою чергу, залежать від поверхневої маси і площі. У роботі Е. Gerretsen досліджує вплив граничних умов на звукоізолюючу здатність перегородки, визначувану в процесі вимірів згідно ISO 140-1.

### **1.3 Метод статистичного енергетичного аналізу (СЕА)**

Метод статистичного енергетичного аналізу (СЕА) виник на принципах теорії В. Вестфалія як теоретична модель, що синтезувала теорію хвильової і статистичної акустики. Він був розроблений на початку 60-х років в США в Центрі акустичних досліджень BBN (Bolt, Beranek and Newman Inc., Cambridge, Massachusetts). Ключовою ідеєю СЕА стало використання аналогій з теорією теплопровідності і застосування принципів статистичної теорії У. Сэбина не лише до повітряних об'ємів приміщень, але і до конструктивних елементів, в яких поширюються хвилі.

Аналогія з теорією теплопровідності була видима вже у формулах В. Вестфалія, але в працях Р. Лайона, Г. Майданика, Е. Эйхлера [124] можна бачити пряме зіставлення процесів передачі теплової енергії і енергії звуку. Коефіцієнт енергетичного зв'язку акустичних підсистем (конструкцій, приміщень) розглядався адекватно коефіцієнту теплопровідності. Усереднені

по резонансних формах коливань (модам) енергії підсистем відповідали параметрам температури тіл, а щільність форм коливань - теплоємності речовини. Як у теорії теплопровідності передавана теплова потужність пропорційна коефіцієнту теплопровідності, різниці температур і геометричним параметрам зв'язку двох тіл, так і в теорії СЕА потужність звукової енергії, що проходить з однієї підсистеми в іншу, пропорційна коефіцієнту акустичного зв'язку підсистем, різниці енергій звуку в підсистемах, приведених до щільності мод в них, і геометричним параметрам з'єднання.

«Статистичний» підхід до вирішення проблеми виразився в аналізі розподілу енергії хвиль в підсистемах. На досить високих частотах в даній смузі частот  $M$  на панелі або в повітряному об'ємі приміщення є значне число власних форм коливань  $N$ . Покладається, що енергія хвиль концентрується в них. Розподіл форм коливань і характер збудження передбачається випадковим, так що доводиться оперувати середніми величинами звукового тиску і параметрів коливання панелей, усередненими в інтервалі частот і в просторі. Значне число мод в смузі частот, їх випадковий розподіл свідчать про достатню дифузність поля хвиль.

Можна представити будівлю як систему, що складається з сукупності підсистем : повітряних об'ємів і конструктивних елементів. У кожній з підсистем при випадковому характері збудження формується поле хвиль так, що кожен з підсистем можна представити як ансамбль власних коливань (мод). Підсистему, що має багато ступенів свободи, можна розглянути як сукупність осциляторів. Допускаючи, що зв'язок між осциляторами досить слабкий, щоб не впливати на їх власні коливання.

Перераховані допущення СЕА істотно звужують сферу застосування методу і тому вимагають ретельного аналізу. У течію вже майже 40 років багато авторів досліджували вплив окремих умов методу на його точність. За останні десятиліття з'явилися цілий ряд робіт, присвячених застосуванню методології СЕА в інженерних розрахунках. Після виходу у світ в 60-х роках

робіт, спрямованих на створення і теоретичне обґрунтування методу, однієї з перших робіт, присвячених методології СЭА для розрахунків звукоізоляції у будівлях явилася робота Crocker M.J., Price A.J. (1969 p.) [112]. У роботі розглядається завдання звукоізоляції перегородки, що розділяє 2 приміщення. З позицій модального аналізу і теорії звукоізлучення Г. Майданика досліджуються коливання прямокутної пластини. Моді коливань пластини на частотах вищі за критичну, що називаються акустично швидкими (AF -моды), характеризуються тим, що довжина вигинистих хвиль в пластині перевищує довжину подовжніх хвиль в повітрі, і пластина випромінює звук усією площею. Акустично повільні моди (AS -моды) характерні тим, що довжина вигинистих хвиль в пластинах менше довжини подовжніх хвиль в повітрі, причому проекції довжин хвиль тангенціальних мод на різні сторони можуть бути більше або менше довжини хвилі в повітрі. Якщо це має місце уздовж однієї сторони пластини, то ці моди називаються крайовими і випромінювання відбувається смугами, рівними чверті довжини из-гибной хвилі уздовж короткої сторони пластини. Якщо проекції довжин вигинистих хвиль на обидві сторони пластини менше довжини подовжньої хвилі в повітрі, то ці моди називаються кутовими (чи поршневыми) і випромінювання відбувається невеликими прямокутними осередками розміром в чверть проекцій довжини вигинистої хвилі по кутах пластини. Акустично повільні моди характеризуються значно меншим випромінюванням звуку, тоді як акустично швидкі моди характеризуються високим звукоізлученням. На критичній частоті проходження звуку зростає завдяки модам, резонансним в смугі з середньою частотою на критичній частоті. Оскільки моди тут є резонансними, те зниження проходження звуку може бути досягнуте тільки за рахунок внутрішніх втрат конструкції. Нижче критичної частоти амплітуда резонансних мод низька і звукоізлучення також не велике. У цій частотній області проходження звуку відбувається завдяки нерезонансним модам, мало залежним від внутрішнього демпфування. У статті відзначається, що вклад нерезонансних мод характеризується законом

мас. На частотах вище критичною амплітуда вібрації панелі і її звукоізлучення мають резонансний характер, проте з подальшим ростом частоти росте вплив внутрішнього демпфування, зростає роль нерезонансного проходження звуку і характер звукоізоляції знову відповідає закону мас.

Розглядаючи далі основи SEA, Crocker M.J., Price A.J. показують на необхідність обліку нерезонансної передачі звуку. Для трьох пов'язаних підсистем (приміщення - панель - приміщення) записуються основні рівняння енергетичного балансу. При цьому розглядається енергетичний зв'язок «приміщення - приміщення» як нерезонансна звукопередача через перегородку, коли в даній смузі частот в панелі не збуджуються резонансні моди, тобто передача відбувається завдяки модам в панелі, що є резонансними за межами даної смуги.

Питання нерезонансної звукопередачи у рамках рішення SEA значно пізніше розглянуті Patil A.R., Crocker M.J., причому нерезонансна звукопередача може відбуватися і через отвори і отвори в конструкції, що захищає. Автори вказують, що за наявності отвору в конструкції на низьких частотах переважає нерезонансна передача через панель, резонансна звукопередача значно слабкіше внаслідок малої щільності мод в низькочастотних смугах. На низьких частотах випромінювання звуку панелями походить тільки від кутів і країв пластини. Нерезонансна звукопередача на низьких частотах через панель істотно вище, ніж через отвір. На високих частотах переважає нерезонансна звукопередача через отвір. За відсутності отвору звукоізоляція визначається резонансною звукопередачею через панель.

Теоретичні і методологічні питання застосування SEA до рішення різних інженерних завдань описані в книзі Р. Лайона (1975 р.). Принципи побудови моделі SEA для вирішення завдань звукоізоляції і складання системи рівнянь енергетичного балансу в матричному виді відносно невідомих енергій вигинистих хвиль в панелях, що захищають, і подовжніх

хвиль в повітрі приміщень описані в роботі Wohle W., Elmallawany A. (1975 р.). Питання методології СЕА стосовно розрахунку звукоізоляції суміжних приміщень розглянуті в роботі Chaumette A., Girard N. [74]. Методика рішення задачі про звукоізоляцію двох діагонально розташованих приміщень показана в роботах Gibbs V. M., Gilford G.L.S. (1976-1977 pp.). Послідовність процедур розрахунку звукоізоляції суміжних і видалених приміщень методом СЕА представлена в статті Trochidis A. Elmallawany A. [127] (1978) використав модель СЕА для розрахунку звукоізолюючої здатності одинарних і подвійних перегородок і відмітив істотну розбіжність експериментальних і теоретичних результатів. Для одинарної конструкції погрішність методу проявилася в області критичної частоти і нижче, що пояснювалося автором обліком тільки резонансною звукопередачі і некоректністю розрахунку коефіцієнта випромінювання. Для подвійної конструкції додаткова погрішність проявилася в області резонансу «маса-повітря-маса».

Серед перших вітчизняних досліджень з використанням методу СЕА, слід зазначити роботу А.Г. Осіпова (1986 р.), каркасно-панельної будівлі, що застосувала його до розрахунку, в якій елементи каркаса виконують роль віброзатримуючих мас при проходженні хвиль через стики панелей.

Некоректне виконання умов і допущень, закладених в первинній моделі СЕА, могло істотно вплинути на точність методу, що відзначалося вже в перших роботах, присвячених інженерному додатку методу. Стаття Vies D.A., Namid S. [63] (1980 р.) присвячена експериментальному визначенню коефіцієнтів енергетичного зв'язку конструкцій між собою і з приміщеннями. Автори запропонували оригінальний метод виміру коефіцієнтів енергетичного зв'язку шляхом послідовного підключення зовнішніх джерел до кожної підсистеми Power ).

Рішення Л. Кремером завдання про проходження хвиль через кутовий стик панелей при похилому падінні хвилі на стик і аналогічне рішення Т. Килмана (Т. Kihlman) для хрестоподібного стику поставило питання про проходження подовжніх і сдвигових хвиль з панелі в панель через стик. У

роботах Wohle W., Beckmann Th., Shreckenbach H., Craven P.G., Gibbs B.M. [107, 108] (1981 р.) отримано рішення про проходження вигинистої хвилі через хрестоподібний стик панелей з перетворенням її в подовжні і сдвигові хвилі. Ці рішення дозволили Р. Лайону (R.H. Lyon) (1986 р.) висунути гіпотезу про вклад подовжніх і сдвигових хвиль в перенесення енергії вібрації по будівлі.

В цей же час (1986-1988гг.) автор справжньої роботи також отримав рішення про проходження вигинистих, подовжніх і сдвигових хвиль через довільні стики панелей з пружними вставками стосовно стиків великопанельної будівлі, що дозволило скласти «повну» модель енергетичного обміну між підсистемами будівлі. При цьому енергетичний обмін між панелями розглянутий з обліком не лише вигинистих, але також подовжніх і сдвигових хвиль. «Повна» модель СЕА використана для розрахунку триповерхового фрагмента великопанельної будівлі.

80-е і 90-і роки відмічені різким ростом числа досліджень, присвячених застосуванню СЕА для віброакустичних розрахунків будівель. Найбільше число публікацій належить Р. Крэйку (R.J.M. Craik)[78, 82- 106]. У своїх роботах, починаючи з Ph.D. дисертації (1980 р.), присвяченій розрахунку поширення звуку у будівлях з використанням СЕА, Р. Крэйк розглянув ряд методологічних завдань застосування методу у будівельній акустиці. У роботах [87, 89, 90] він досліджує причини погрешностей, що отримуються з використанням СЕА, і відмічає, що частина помилок має статистичний характер і пояснюється точністю вимірів параметрів звуку і вібрації. Стандартне відхилення розрахункових параметрів звуку і вібрації відносно вимірних значень складає в середньому 2 дБ і росте з пониженням частоти. Істотний вплив на точність розрахунку поширення звуку методом СЕА робить якість виробництва будівельно-монтажних робіт. Відмінності в якості закладення стиків призводять до того, що віброізоляція стиків однакових конструкцій різна. Істотний вплив на звукоізоляцію робить і непряма звукопередача повітряними шляхами (через щілини, отвори і отвори).

Погрішність методу СЕА, що не враховує реальну якість робіт, на думку автора, складає в середньому близько 2 дБ.

#### **1.4. Теорія і експериментальні дослідження поширення звукових вібрації через стики будівельних конструкцій**

Як відзначалося вище, ймовірно, перше рішення задачі про проходження хвиль через стики конструкцій опубліковане Л.М. Бреховских в 1944 році [12]. У цій роботі закладена методологія рішення цього класу завдань, яка зводиться до представлення функцій зміщень в перерізах напівнескінченних конструкцій, пов'язаних стиком, у вигляді показової функції відносно хвилевого числа до  $i$  координати  $x$ .

Цей же принцип використаний в опублікованому Л. Кремером в 1953 році рішенні завдань про проходження вигинистих і подовжніх хвиль через стики стержнів, сполучених під прямим кутом, а також через лінійний стик стержнів з пружним прокладенням [110]. У цій роботі дано рішення для простішого завдання - стиків стержневих конструкцій, але автор розглянув різну конфігурацію стиків стержнів, сполучених під прямим кутом. У напружено-деформованому стані кутового з'єднання стержнів Л. Кремер врахував не лише поперечні сили і моменти, поперечні зміщення і кути повороту, характерні для чистого вигину, але і подовжні сили і зміщення. Таким чином, при падінні вигинистої хвилі на кутове з'єднання утворюються подовжні хвилі. Л. Кремер поставив і вирішив завдання про проходження подовжніх і вигинистих хвиль в лінійному хвилеводі з пружною вставкою (прокладенням).

Для теорії Л. Кремера характерне використання загальної системи координат для усіх стькуємых елементів, що помітно ускладнює рішення задачі для стиків різної конфігурації, особливо якщо в стикі є пружні або жорсткі вставки.

Експериментальну перевірку теорії Л. Кремера виконали А. Eisenberg



[125], Exner M.L., Bohme W., Kurtze G., Tamm K., Vogel S. У їх роботах розроблена методика виміру віброізолюючої здатності стиків на стержневих моделях. Стик формувався двома стержнями, вільні кінці яких були загострені і занурені в демпфуюче середовище з піску і тирси. Кріплення стержнів в стику могло бути жорстким, шарнірним, або через прокладення. Віброізоляцію в лінійному вібродроті з прокладенням досліджували Exner M.L. і Bohme W., через два роки їх експеримент, але вже на кутовому стику, повторили Kurtze G., Tamm До., Vogel S. А. Eisenberg удосконалив методику вимірів, що дозволило йому виміряти ізоляцію вигинистих хвиль лінійним стику з різними прокладеннями, що знаходяться під статичним навантаженням до 1 МПа.

Експериментальні роботи на стержневих моделях повністю підтвердили теорію Л. Кремера. В результаті було показано, що віброізолююча здатність жорстких стиків залежить від співвідношення інерційних і пружних характеристик стькуемых стержнів. Віброізоляція в стиках однакових елементів невелика: 3, 6 і 9 дБ, відповідно, для L - образного, T-подібного і хрестоподібного стиків. Зміна товщини і поверхневих мас елементів в межах конструктивних можливостей реальної будівлі може дати ефект ізоляції лише в декілька децибел. Застосування прокладень в лінійному стику дає ефект ізоляції на середніх і високих частотах. Величина ефекту залежить від жорсткості прокладень і може досягати 20...30 дБ. Ефект стислих прокладень дещо нижчий - 10... 15 дБ при навантаженні в 1МПа, що приблизно відповідає напрузі в горизонтальному стику 2...3 поверху 5-поверхової будівлі. Ефект прокладень в кутовому стику проявляється в усьому діапазоні частот і складає до 30 дБ.

У роботі Л.Я. Гутина [19] також розглянуто завдання поширення подовжніх і вигинистих хвиль через стики напівнескінчених пластинів. Розглянуті випадки нормального і похилого падіння вигинистих хвиль на межу двох пластинів, вирішені завдання про нормальне проходження вигинистих хвиль через ряд перешкод, через прокладення. Автором

скоректовано положення Л. Кремера про частоти повної ізоляції для стиків з прокладеннями.

Проходження подовжніх і вигинистих хвиль при нормальному їх падінні на жорсткий хрестоподібний стик напівнескінченних пластинів досліджували А.С. Никифоров і С. В. Будрин [13, 76]. Автори використали приватні системи координат для стькуемых конструкцій, що дозволило знайти загальне рішення задачі про віброізоляцію жорсткого стику, не залежне від числа панелей в стику. Коефіцієнти проходження енергії хвиль знаходилися з рішення системи дванадцяти комплексних рівнянь алгебри, що задовольняють граничним умовам. У разі похилого падіння вигинистих хвиль автори нехтували подовжніми хвилями.

В. Т. Ляпуновим знайдено рішення задачі про проходження вигинистої хвилі, що похило падає, через лінійний шарнірний стик пластинів [65], періодичні перешкоди на пластині [67], фланцеве з'єднання через прокладення [66], прокладення того ж розміру, що і пластини в їх лінійному стику [68, 69]. Віброізоляцію при дифузному падінні вигинистих хвиль через стик автор отримав шляхом чисельної інтеграції коефіцієнтів проходження енергії хвиль, вчислених при похилому падінні.

Оригінальне рішення завдань про проходження вигинистих і подовжніх хвиль через стики стержнів різної конфігурації дав А.В. Захаров [28, 29, 45]. У основу його методики розрахунку покладено припущення про квазіудар мас стержнів, охоплених однією довжиною хвилі. Результати, отримані А.В. Захаровим для жорстких стиків стержнів, схожі з результатами Л. Кремера внаслідок того, що рішення рівнянь збереження енергії і імпульсу «волнонов» для простих випадків стиків стержнів дають аналогічне рішення. Експериментальні дослідження віброізолюючої здатності стиків стержнів проводилися В. Т. Мартиновим в МИСИ. Окрім стиків, їм досліджувався процес поширення вигинистих хвиль по одно- і двохярусним рамам. У основу методики вимірів були покладені роботи німецьких учених.

У перелічених вище роботах розглянуті найбільш прості завдання

проходження хвиль через стики стержневих конструкцій або пластинів при нормальному падінні хвиль. Досліджуючи проходження хвиль при похилому падінні автори спрощували картину напружено-деформованого стану, виключаючи сили і зміщення уздовж лінії стику і, тим самим, унеможлилювали утворення поперечних хвиль. Точне рішення задачі про проходження хвиль 3 типів для кутового стику пластинів описане в книзі Л. Кремера, М. Хекла і Е. Унгара (Cremer L., Heckl M., Ungar E.) [111]. Використовуючи апарат векторної алгебри, автори описали процес суперпозиції подовжніх і сдвигових хвиль в площині пластини при їх похилому до стику поширенні через потенціали швидкостей. Другим ключовим принципом рішення цієї задачі стало використання закону Снеллиуса і підстановка комплексних трансцендентних функцій кута падіння. Цією теорією скористалися Wohle W., Beckmann Th., Shreckenbach H. для вирішення завдання про проходження похилих і дифузних вигинистих, подовжніх і сдвигових хвиль через хрестоподібний стик пластинів. Автори представили стик як з'єднання пластинів через деякий пружний брус, що дозволяє при складанні рівнянь граничних умов формально задавати пружні характеристики з'єднання. Рішення задачі про дифузне проходження вигинистих, подовжніх і сдвигових хвиль через жорсткий крестообразный стик отримане Craven P.G., Gibbs B. M. [107, 108]. Приведені результати розрахунку проходження хвиль трьох типів через стик. Т. Килмэн (T. Kihlman) також розглянув завдання про похиле проходження вигинистих хвиль через стик пластинів.

Аналізуючи результати рішення деяких завдань, отримані в роботах [108], слід зробити висновок про те, що коефіцієнти проходження енергії вигинистих, подовжніх і сдвигових хвиль складним чином залежать від кута падіння, від частоти, від параметрів панелей. Вичисливши коефіцієнти проходження енергії хвиль через стик як власну характеристику віброізоляції стику, можна по формулах М. Хекла (Heckl M.) визначити коефіцієнти енергетичного зв'язку конструктивних елементів будівлі для розрахунку

методом статистичного енергетичного аналізу.

У останні десятиліття ряд дослідників розглядали завдання про проходження хвиль через стик, як в теоретичному, так і в інженерному аспекті. Gudmundsson S досліджував проходження хвиль через дві паралельні пластини, сполучені через пружні прокладення. Rosenhouse G., Mechel F.P. [376] досліджували вплив шарніра на проходження вигинистих хвиль через стик. Leung R.C.N., Pinnington R.J. розглянули проходження хвилі при нормальному падінні через стик пластинів, представивши прокладення у вигляді пружинного з'єднання.

Автор справжньої роботи в 1985-1987 рр. знайшов рішення задачі про проходження хвиль при похилому і дифузному падінні через стики конструкцій будівель довільної конфігурації з довільним заповненням м'якими і жорсткими матеріалами, причому рішення знайдене в традиційній постановці технічної механіки, тобто через зміщення, а не швидкості коливань.

## **1.5 Висновки по першому розділу**

1. Проблеми звуко-віброізоляції в цивільних будівлях обумовлені традиційними об'ємно-планувальними і конструктивними рішеннями будівель, високою звукопровідністю конструкцій, значною потужністю і дисперсним розподілом джерел шуму і вібрації у будівлях. Існуючі методи розрахунку і проектування звукоізоляції у будівлях орієнтовані на рішення приватних завдань і не мають системного характеру, не враховують основні віброакустичні характеристики будівлі як цілісної системи.
2. Акустичне проектування будівель слід розглядати як загальне завдання, що включає ряд приватних завдань обміну енергії звукових хвиль між конструкціями і приміщеннями. У основу як загальних, так і приватних розрахункових моделей слід покласти сучасний стан хвилевої теорії. З

усіх описаних вище методів віброакустичного розрахунку метод статистичного енергетичного аналізу (СЕА) нині є найбільш теоретично обґрунтованим і в перспективі зручним для виконання інженерних розрахунків поширення звуку і вібрації у будівлях. Застосування методу СЕА вимагає розвитку методології розрахунку і розробки основних розрахункових схем стосовно будівель і їх фрагментів.

3. Проблемою впровадження методу СЕА в практику акустичного проектування будівель є недостатня точність методу. З одного боку, підвищення точності можна добитися розширенням моделі СЕА з урахуванням усіх основних форм енергетичного обміну між елементами (підсистемами) будівлі, включенням в розгляд усіх основних типів хвиль як носителей звукової енергії. З іншого боку, слід уточнити хвилеві рішення для самих підсистем і їх зв'язків. Вимагає уточнення і розрахунок власних частот і щільності мод коливань в конструкціях і приміщеннях в розрахункових смугах частот.
4. Одним з ключових завдань СЕА є розрахунок проходження енергії хвиль усіх основних типів через стики будівельних конструкцій. У загальному випадку в конструкціях можуть поширюватися вигинисті, подовжні і поперечні хвилі, тому і завдання розрахунку віброізоляції стиків конструкцій повинне вирішуватися з урахуванням цих типів хвиль. Слід вирішити теоретичні і методологічні питання розрахунку поширення вигинистих, подовжніх і поперечних хвиль через стики конструкцій довільної конфігурації і з довільним заповненням, стосовно стиків реальних конструкцій.

## РОЗДІЛ 2

### РОЗВИТОК МЕТОДОЛОГІЇ СТАТИСТИЧНОГО ЕНЕРГЕТИЧНОГО АНАЛІЗУ З УРАХУВАННЯМ ОСОБЛИВОСТЕЙ ОБ'ЄМНО- ПЛАНУВАЛЬНИХ РІШЕНЬ ЦИВІЛЬНИХ БУДІВЕЛЬ

#### 2.1 Основні принципи системного підходу до проектування звукоізоляції в цивільних будівлях

Принципи системного підходу до акустичного проектування об'єктів, сформульовані А.С. Никифоровим, стосовно цивільних будівель можуть бути представлені у вигляді наступних положень:

- функціональна організація будівлі, побудована на принципах зонування приміщень, у тому числі по шумності і віброактивності процесів;
- поліпшення власних віброакустичних характеристик конструкцій, віброізоляції і герметичності стиків конструкцій;
- оптимізація об'ємно-планувальних і конструктивних рішень за критерієм виконання санітарних норм по шуму і вібрації у рамках рішення загальної задачі поширення звуку і вібрації по будівлі або його фрагменту при заданих потужностях потенційних джерел віброакустичного забруднення.

Як відзначалося в першому розділі, звукоізоляція приміщень у будівлях залежить не лише від звукоізолюючої здатності окремих конструкцій, але і від умов поширення звукової вібрації по конструкціях. При цьому якість акустичного режиму в приміщеннях цивільних будівель залежить від ряду чинників, що визначають розміщення і потужність джерел звуку і вібрації, а також звукову провідність конструктивного остову будівлі.

Першим принципом є функціональна організація будівлі, що передбачає відповідне розділення або поєднання процесів, пов'язаних з шумними або тихими умовами. Ключовим правилом, що забезпечує акустичний комфорт, є

угруповання тихих і шумних приміщень у відповідні функціональні зони і розділення цих зон приміщеннями, що виконують буферну функцію. У шумних зонах розміщуються приміщення, функціональні процеси в яких неминуче призводять до виникнення шуму. Це приміщення, в яких розміщується технологічне, інженерне і санітарно-технічне устаткування, вбудовані приміщення обслуговування, приміщення стоянок автомобілів. «Тихі» приміщення повинні відповідати значно більш високим вимогам до акустичного режиму, проте часто вони самі можуть бути джерелами шуму з високими рівнями, як, наприклад, житлові кімнати квартир.

Досвід експертизи проектів показує, що архітекторы-проектувальники при розробці об'ємно-планувального рішення будівлі часто ігнорують ці правила. Цьому сприяє недосконалість сучасної нормативної бази по проектуванню житлових і громадських будівель, де не регламентується порядок розташування ряду приміщень з шумними функціональними процесами. У житлових будівлях найбільш характерними помилками є розміщення санвузлів, що примикають до спальних кімнат суміжної квартири, розміщення автостоянок в підвалах багатоповерхових будівель без проміжного технічного поверху, розміщення в цокольних поверхах цілодобових ресторанів, барів, казино і тому подібне. У сучасних багатоквартирних будівлях розміщуються опалювальні агрегати, насоси підкочування води, вентиляційні установки, що створюють шум до 90 дБА. За наявності потужних джерел шуму посилення звукоізоляції окремих конструкцій не приносить очікуваного результату внаслідок непрямой звукопередачі. Тому акустичне проектування вимагає застосування комплексної методології, що включає не лише оцінку звукоізолюючої здатності окремих конструкцій, але і виконання віброакустичного розрахунку будівлі в цілому або його фрагмента.

Конструктивні рішення, задаючи власні віброакустичні характеристики конструкцій, вібропровідність і герметичність їх вузлів, є другим чинником, що впливає на звукоізоляцію приміщень. Звукоізоляція значною мірою

залежить від звукопровідності конструктивного остову будівлі. У свою чергу, звукопровідність конструкцій будівель залежить від їх однорідності. Найбільшу звукопровідність мають монолітні будівлі, за ними йдуть великопанельні і каркаснопанельні будівлі з їх проблемами герметизації стиків і технологічних отворів. Меншу провідність звуку мають будівлі в цегляному виконанні з масивними стінними конструкціями.

Дійсно, конструкції монолітних і великопанельних будівель із залізобетону є значно одноріднішими, ніж конструкції будівель з традиційних матеріалів, де застосовуються цеглина, будівельні і штукатурні розчини, метал і дерева одночасно. Якщо в мелкоэлементных будівлях стіни, перекриття і перегородки значно відрізняються поверхневою масою і жорсткістю, то у великопанельних будівлях ці відмінності мінімальні. У стиках великопанельних будівель практично немає розриву у фізичних і геометричних параметрах. Порівняння пружно-диссипативних характеристик (модуля пружності і коефіцієнта втрат) важкого бетону ( $E = 2,6 \dots 2,98 \cdot 10^{10}$  Па,  $n = 4 \dots 8 \cdot 10^{-3}$ ), цеглини ( $E = 1,6 \cdot 10^{10}$  Па,  $n = 4 \dots 8 \cdot 10^{-2}$ ) і деревини ( $E = 1 \dots 10 \cdot 10^9$  Па,  $n = 0,8 \dots 2 \cdot 10^{-2}$ )[111] дозволяє судити про підвищену звукову провідність бетонних конструкцій.

Можливості ізоляції звукової вібрації у будівлях дуже обмежені. Ефект може бути досягнутий в результаті:

- використання віброзатримуючих мас;
- значної відмінності в товщині і поверхневій щільності конструкцій, зв'язаних в стиках;
- використання звукоізоляційних прокладень в стиках конструкцій;
- застосування обшивок на віднесенні по стінах і стелях, а також конструкцій плаваючих підлог.

Перший спосіб зниження структурного шуму можливий в каркаснопанельних або об'ємно-блокових будівлях, де роль віброзатримуючих мас можуть грати елементи стержневого типу (колони, ригелі) або ребра жорсткості, що несуть. Питання зниження структурного



шуму за допомогою вібротримуючих мас розглянуті А.Г. Осіповим. Сукупність запропонованих їм заходів дозволяє понизити рівень звукового тиску в суміжних і видалених приміщеннях на 5... 10 дБ.

У будівлях, що будуються за безкаркасною стінною конструктивною схемою можливе застосування другого і третього способів підвищення ізоляції звукової вібрації. У великопанельних будівлях панелі зовнішніх стін мають товщину 200...400 мм, внутрішні стіни і перекриття - 100...200 мм і панелі перегородок - 50...80 мм, що саме по собі, дає ізоляцію структурних хвиль в стиках панелей різної товщини, в межах 3 дБ [111]. Збільшувати товщину деяких конструкцій заради ізоляції звукової вібрації в стиках, економічно недоцільно.

Третій спосіб ізоляції звукової вібрації і зниження структурного шуму у великопанельних будівлях є досить перспективним. Ефект від застосування прокладень в стиках залежить від їх жорсткості, що для прокладень із звукоізоляційних матеріалів практично визначається статичним навантаженням на прокладення. За розрахунками Л. Кремера [111] і В. Т. Ляпунова віброізолююча здатність стиків з прокладеннями може на десятки децибел перевищувати віброізолюючу здатність жорстких стиків. Застосування прокладень в стиках несних конструкцій має обмеження, пов'язані з технологією монтажу, забезпеченням просторової жорсткості будівлі і захистом анкерних з'єднань від корозії. Звукоізолюючі прокладення доцільно застосовувати в стиках і під опорою елементів, що самонесущих, перегородок, сантехкабин, під плитами плаваючої підлоги і опорними елементами інженерного устаткування.

Четвертий спосіб зниження звукової вібрації спрямований на ізоляцію жорсткого конструктивного остову будівлі від виникнення в ній звукової вібрації. Розвиток «сухих» методів обробки приміщень будівель із застосуванням гіпсокартонних, гіпсоволокнистих плит, пластикових, дерев'яних і інших декоративних облицювальних панелей сприяє широкому використанню цього методу зниження звукової вібрації. Облицювання на

віднесенні по каркасу, прикріпленому до стін, що несуть, через пружні прокладення, спільно з конструкцією «плаваючої» підлоги створюють ефект, що називається «коробка в коробці». В результаті зниження рівнів звукової вібрації в остові, що несе, може досягати 10 дБ і більше.

Оптимальне акустичне проектування цивільних будівель, що мають складну функціональну організацію і оснащених численними побутовими і інженерно-технічними агрегатами, вимагає створення сучасної методики розрахунку, заснованої на комп'ютерному моделюванні процесів поширення звуку і вібрації у будівлі. Метод статистичного енергетичного аналізу дозволяє ставити і вирішувати ці завдання, для чого слід розробити фізичну модель обміну енергією хвиль основних типів між елементами (підсистемами) будівлі, що забезпечує прийнятну точність розрахунку. Слід також розробити розрахункові схеми і методики СЭА для характерних об'ємно-планувальних елементів і вузлів будівлі, а також вирішити ряд завдань поширення звукових хвиль по конструкціях будівель і через характерні їх сполучення.

## **2.2 «Повна» модель статистичного енергетичного аналізу**

У першій главі описані основні положення моделі статистичного енергетичного аналізу, що включає енергію хвиль в повітряних об'ємах приміщень і енергію вигинистих хвиль на конструкціях. У будівельних конструкціях поширюються також подовжні і сдвигові хвилі. Розрахунки параметрів проходження хвиль трьох типів через стики панелей [107, 108] показали, що коефіцієнти проходження подовжніх і сдвигових хвиль через стики будівельних панелей мають той же порядок значень, що і вигинисті хвилі, тому нехтувати ними неправомірно. У роботах [94, 98, 99] показано, що модель СЕА, що враховує тільки вигинисті хвилі в конструкціях забезпечує прийнятну точність розрахунку звукоізоляції тільки суміжних приміщень, а для розрахунку фрагмента будівлі, що включає не менше 3

приміщень і конструкцій, що захищають їх, слід використати модель СЕА, що більш повно враховує фізичну картину поширення і перетворення хвиль усіх основних типів.

«Повною» моделлю СЕА дуже умовно можемо рахувати таку модель, яка б більшою мірою враховувала сучасні уявлення про поля хвиль у будівельних конструкціях. Слід зазначити, що в загальному випадку у будівельних панелях можуть поширюватися так звані вільні хвилі, або хвилі Лэмба, які можна класифікувати як 4 сімейства хвиль. Перші два сімейства хвиль відносять до чистих сдвиговим хвиль - з симетричними і антисиметричними зміщеннями відносно подовжньої осі панелі, що відповідає напрямку поширення хвилі. Зміщення в цих двох хвилях перпендикулярні напрямку поширення хвиль. Два інші сімейства вільних хвиль характеризуються складнішими залежностями зміщень, причому не лише в площині, але і з площини панелі. Ці сімейства хвиль можуть мати симетричні або антисиметричні зміщення відносно осі, що знаходиться в площині панелі. На відміну від сімейств сдвигових хвиль, фазові швидкості поширення хвиль третього і четвертого сімейств залежать від частоти коливань. Така залежність, що називається дисперсійною, обумовлена фізичними властивостями середовища, залежністю пружної напруги в ній не лише від деформацій, але і від швидкості зміни деформацій [32]. На досить низьких частотах симетрична хвиля 3-го типу класифікується як квазі-подовжня хвиля, а хвиля з антисиметричними зміщеннями 4-го типу - як вигиниста.

Для цілей віброакустичного розрахунку будівель методом СЕА доцільно розглянути сдвигові симетричні хвилі нульового порядку, квазі- подовжні хвилі, що поширюються в площини панелі, і вигинисті хвилі, що мають виражені зміщення з площини панелі і безпосередньо призводять до випромінювання звуку конструкціями. Для розширення частотного діапазону, в якому ці спрощення прийнятні, використовуватимемо, надалі, функції, що коригують, дозволяють врахувати характер дисперсії подовжніх

і вигинистих хвиль на високих частотах.

Розширимо відому модель статистичного енергетичного аналізу, уявивши, що в кожному конструктивному елементі (у будівельних панелях) незалежно один від одного є присутніми енергії хвиль трьох типів : вигинистих, подовжніх і сдвигових, тобто кожен конструктивний елемент складається з трьох енергетичних підсистем. Очевидно, що обмін енергією між конструктивними елементами відбуватиметься між трьома полями хвиль, що містяться в кожній з них, а обмін між акустичними підсистемами (приміщеннями) і конструктивними підсистемами відбуватиметься між полями вигинистих хвиль в конструкціях і полями подовжніх хвиль в повітрі приміщень.

Для представлення енергетичного взаємозв'язку підсистем в повній моделі СЕА, розглянемо систему, що включає дві панелі з індексами  $i$  і  $j$ , і один повітряний об'єм приміщення з індексом  $do$ . Допустимо, що кожна панель складається з 3 незалежних підсистем, що несуть енергію вигинистих, подовжніх і сдвигових хвиль. Представимо енергетичну взаємодію конструкцій, що захищають, і приміщень між собою у вигляді схеми на рис. 2.1.

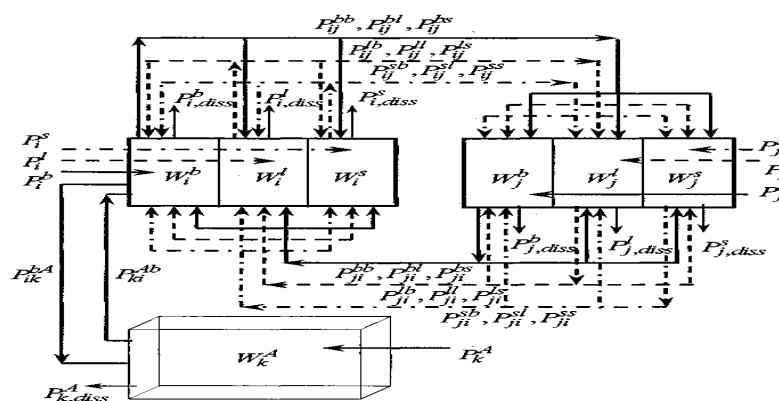


Рисунок 2.1 -Схема енергообміну між акустичною і конструктивними підсистемами при поширенні по панелях вигинистих, подовжніх і сдвигових хвиль

### **2.3 Об'ємно-планувальні елементи будівлі і розрахункові схеми фрагментів будівлі в розрахунку методом статистичного енергетичного аналізу**

Сучасна типологія цивільних будівель включає житлові і громадські будівлі різного функціонального призначення. При усьому їх різноманітті планувальні системи житлових і громадських будівель зводяться до відомої класифікації схем : коридорна, анфіладна, центрична, зальна, і секційна. Житлові будівлі квартирного типу мають переважно секційну планувальну схему; гуртожитки, готелі і удома інтернати - коридорну. Широка типологія громадських будівель може бути представлена усіма видами схем, в межах однієї будівлі може поєднуватися ряд планувальних схем. Методологія проектування будівель масової забудови заснована на принципах уніфікації елементів, причому не лише конструктивних, але і планувальних. Реалізація принципів функціональної організації і зонування простору у будівлях призводить до утворення досить стереотипних планувальних вузлів.

Незважаючи на відмінності в планувальній організації, розмірах і поверховості будівель, їх можна представити у вигляді сукупності планувальних елементів - приміщень, що мають переважно прямокутну форму.

Приміщення житлових, учбових, лікувальних і адміністративних будівель, як правило, співвимірні, тобто по класифікації що мають співвідношення найбільшого розміру до найменшого - не більше 5. Якщо прийняти як критерій дифузності поля хвиль в приміщенні число мод в межах смуги частот  $\Delta N > 50$ , то для таких приміщень при невеликому їх об'ємі (близько  $60 \text{ м}^3$ ) дифузність звукового поля може бути забезпечена практично в усьому нормованому діапазоні частот (100-5000 Гц) при октавному частотному аналізі і від 200 Гц при третьоктавном аналізі. Для співвимірних приміщень з об'ємом більше  $160 \text{ м}^3$  дифузність досягається, практично, з третьоктавної смуги 100 Гц. Приміщення цивільних будівель

класифікуються як плоскі, якщо горизонтальні розміри більш ніж в 5 разів перевищують висоту (торгові, операційні зали магазинів і підприємств соціальної культури, холи, вбудовані гаражі-стоянки і ін.), або як довгі, якщо ширина значно менше довжини (коридори). У неспіввимірних приміщеннях звукове поле може мати нерівномірний розподіл звукового тиску, тому застосування наближених методів розрахунку поширення звуку у будівлях з такими приміщеннями, зокрема методу СЕА, вимагає додаткових досліджень і нових підходів. У цій роботі усі дані приміщення прийняті співвимірними, а звукове поле в них дифузним.

Вирішуючи завдання віброакустики цивільних будівель, слід визначити параметри шуму і вібрації в приміщеннях, що знаходяться у безпосередній близькості від потенційного джерела акустичного дискомфорту. Тому часто не виникає необхідності робити розрахунок будівлі в цілому, досить розрахувати характерні планувальні вузли будівлі. Питання про достатність розмірів розрахункового фрагмента будівлі може бути вирішене шляхом розгляду різних фрагментів і оцінкою точності обчислень. Найбільш доцільним розрахунковим фрагментом будівлі, очевидно, являється такий фрагмент, розмір якого забезпечує достатню точність при мінімумі об'єму обчислень. Об'єм обчислень по повній моделі СЕА може бути оцінений числом рівнянь у формованій матричній системі виду. Відповідно до повної моделі СЕА кількість рівнянь енергетичного балансу і число невідомих значень енергії хвиль в елементах будівлі дорівнює  $3N + M$ , де  $N$  - число конструктивних елементів, а  $M$  - число приміщень в даному фрагменті будівлі. Для малого фрагмента, що включає одне або два приміщення, може бути використана і усічена модель СЕА, в якій в розгляд приймаються тільки вигинисті хвилі в конструкціях.

Об'єм обчислень є істотним чинником, що визначає можливість віброакустичного розрахунку будівлі з використанням сучасних засобів обчислень. Розглянемо ряд варіантів об'ємнопланувальних вузлів будівлі, представимо для них розрахункові схеми і визначимо об'єм обчислень, що

відповідає їм.

Прямокутне приміщення, захищене 6 панелями. Цей розрахунковий фрагмент (рис. 2.2) є простим планувальним елементом будівлі, в якій можна прогнозувати рівні шуму в приміщенні і вібрації на конструкціях, що захищають його, за наявності джерел відомої потужності. Розрахункова схема (рис. 2.3) представляє дану систему, що включає 1 акустичну і 6 конструктивних підсистем. На схемі паралелепіпедами показані конструктивні елементи, а колом позначено приміщення. Стрілки, виконані суцільними лініями, відповідають зв'язкам між конструкціями, а штриховими лініями - між конструкціями і приміщеннями. Тут і далі на малюнках вказані номери розрахункових елементів.

У розрахункових елементах даного фрагмента переважають прямі потоки енергії безпосередньо від підсистеми з джерелом, що дозволяє нехтувати відтоком енергії в зв'язані приміщення і конструкції. Менше і вплив енергії подовжніх і сдвигових хвиль в конструкціях, що утворюються в результаті трансформації хвиль при проходженні вигинистих хвиль через стики конструкцій. Це дозволяє застосувати усічену модель СЕА з числом рівнянь і невідомих рівним 7. Відповідно до повної моделі СЕА в цій енергетичній системі є 18 невідомих параметрів енергії хвиль трьох типів в конструктивних підсистемах і один невідомий параметр енергії в акустичній підсистемі.

Схема (рис. 2.2) відповідає випадку, коли усі конструкції є одношаровими і акустично однорідними. Якщо є додаткові конструктивні елементи, наприклад, плита «плаваючої» підлоги, обшивка стін «на віднесенні» або підвісна стеля, та кількість даних конструктивних підсистем в цьому фрагменті збільшується.

Більше число конструктивних підсистем доводиться розглядати і у разі, якщо конструкції стін і перекриттів є багатошаровими. Додаткові конструктивні елементи слід розглядати як конструктивні підсистеми, пов'язані через пружно-дисипативні зв'язки з несними або зв'язаними з ними

конструкціями. Коефіцієнти енергетичного зв'язку між зв'язаними конструкціями, наприклад, плитою плаваючої підлоги і плитою, що несе, можуть бути знайдені з використанням традиційних підходів.

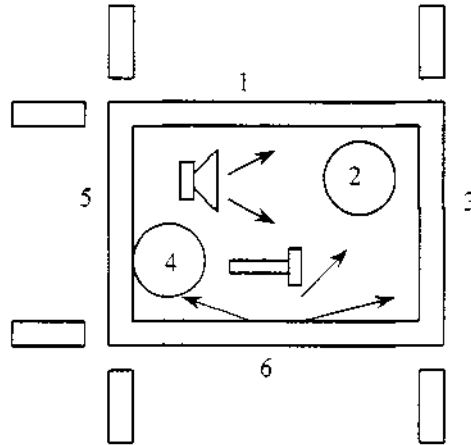


Рисунок 2.2 - Прямокутне приміщення, огорожене 6 панелями

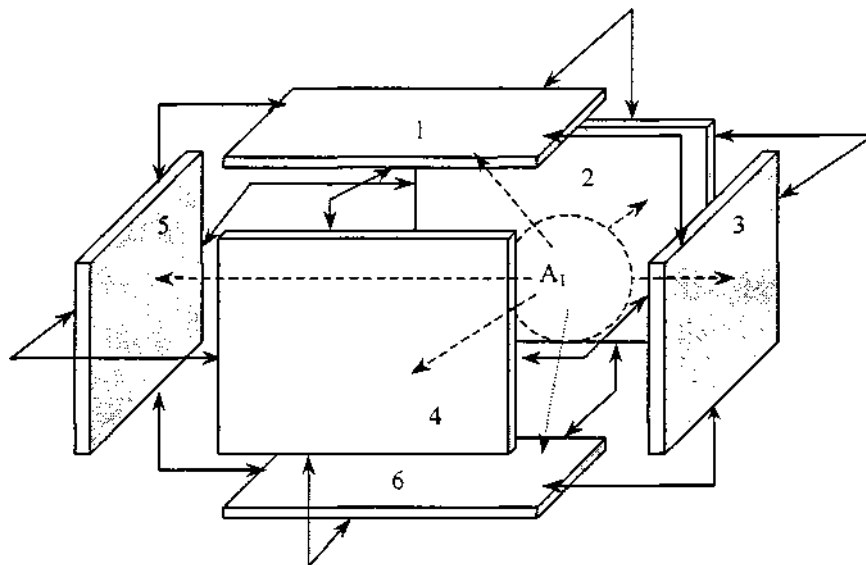


Рисунок 2.3 - Розрахункова схема для приміщення, захищеного 6 панелями

Відтік енергії в суміжні конструкції частково можна врахувати, розглядаючи стики панелей, що захищають, не як кутові, а як фактично наявні в даній будівлі, у тому числі Т-подібні і хрестоподібні. В цьому випадку розрахункові коефіцієнти проходження енергії хвиль через стики конструкцій, що захищають приміщення, зменшуються за рахунок



перерозподілу енергії хвиль.

Два суміжні приміщення. Це стандартний випадок сполучення двох суміжних приміщень по вертикалі або горизонталі через перекриття або стіну без отвору, для якого визначається звукоізоляція від повітряного або ударного шуму (рис. 2.4.).

Для цього фрагмента будівлі маємо 2 акустичних підсистеми (приміщення) і 11 панелей, що захищають їх. За наявності багат шарових конструкцій, що захищають, розрахункове число конструктивних підсистем збільшується, як і у попередньому випадку. Простіша схема енергетичної взаємодії підсистем, властива, наприклад, великопанельним житловим будівлям з пологою з лінолеуму, може бути представлена у вигляді рис.2.4 Для цього фрагмента число невідомих значень енергії хвиль, згідно повної моделі СЕА, дорівнює  $3N$

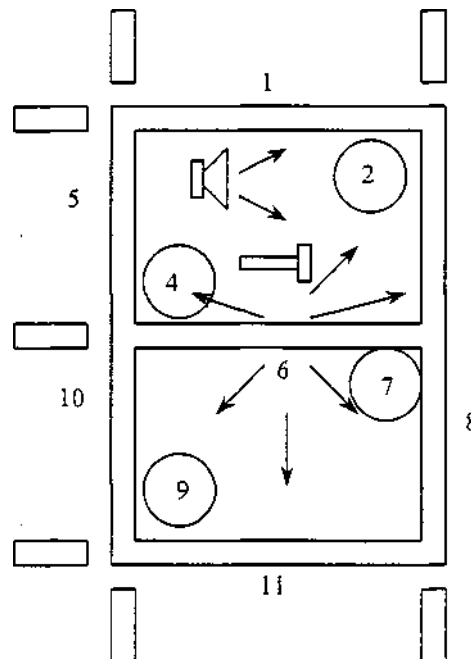


Рисунок 2.4 - Два суміжні приміщення, захищених 11 панелями

Тут може бути використана і усічена модель СЕА, в якій в розгляд приймаються тільки вигинисті хвилі в конструкціях. В цьому випадку число рівнянь енергетичного балансу в системі дорівнює  $11+2=13$ . У розрахунках

коефіцієнтів енергетичного зв'язку між панелями доцільно розглядати реальну конфігурацію стиків, використовуючи в розрахунках СЕА параметри проходження енергії в кутовому напрямі. У розрахунках звукоізоляції суміжних приміщень методом СЕА слід враховувати нерезонансну звукопередачу, що описується енергетичним зв'язком між приміщеннями  $A_1 \rightarrow A_2$  через конструкцію, що захищає.

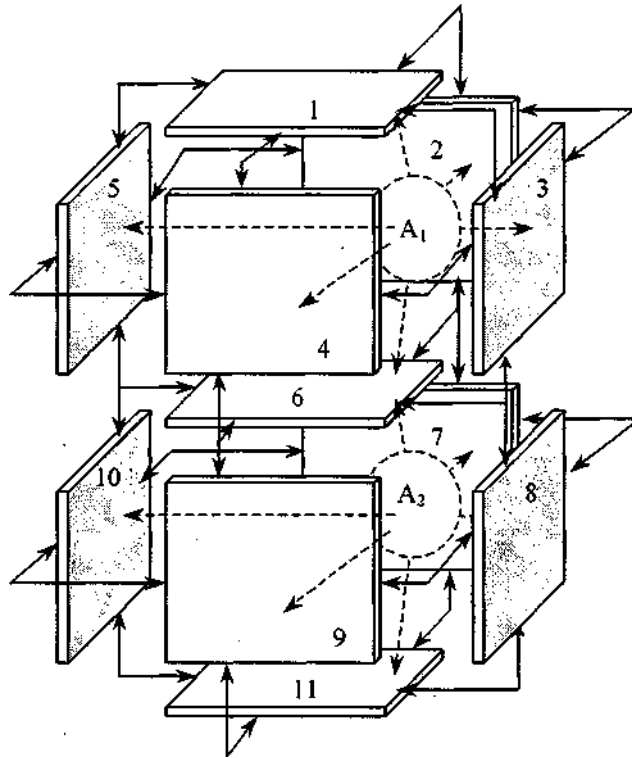


Рисунок 2.5 - Розрахункова схема для двох суміжних приміщень, захищених 11 панелями.

Три приміщення, побудовані в лінію. Ця схема представляє інтерес для розрахунку рівнів шуму і вібрації у видалених приміщеннях, коли між приміщенням з джерелом і приймальним приміщенням є ще одне приміщення (рис. 2.6). Даний випадок є характерним прикладом структурної звукопередачі і може бути використаний для оцінки акустичного забруднення приміщень будівлі, якщо в ній є планувальні осередки, в яких розміщені потужні джерела шуму і вібрації.

У будівлі можуть розташовуватися технічні приміщення і технічні

поверхи, призначені для розміщення систем інженерного забезпечення, машинних відділень ліфтів, стоянок автомобілів і тому подібне. Ця схема дозволяє провести аналіз і оптимізацію об'ємно-планувального рішення будівлі і його окремих планувальних вузлів. Наприклад, оптимізувати розміщення і блокування санвузлів і кухонь суміжних квартир, розміщення технічних приміщень, що виконують буферну функцію, знаходячись між приміщеннями з джерелами шуму і вібрації і приміщеннями, що вимагають акустичного комфорту. Оскільки в цьому фрагменті будівлі є 3 послідовно розміщених приміщення і 16 панелей, що захищають їх, те число рівнянь і порядок матричної системи дорівнюють 51.

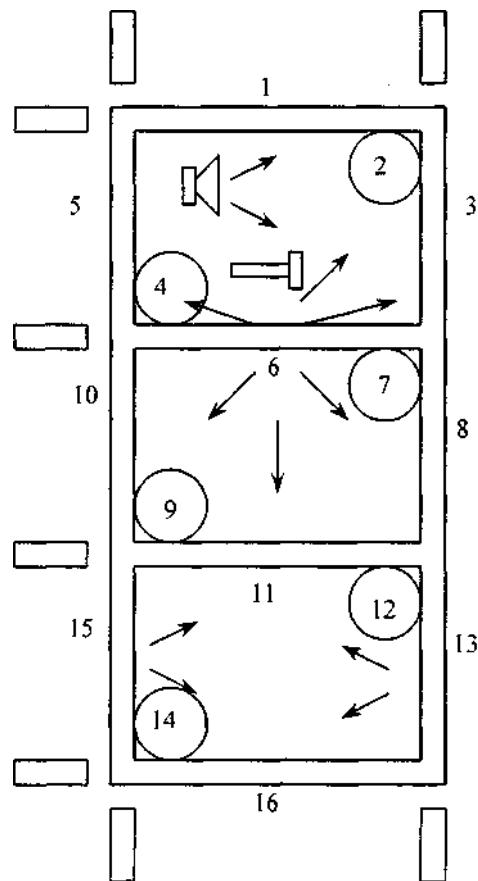


Рисунок 2.6 - Три приміщення, побудовані в лінію

Усічена модель СЕА для такого фрагмента будівлі припускає рішення системи 19 лінійних рівнянь алгебри, проте ігнорування подовжніх і сдвигових хвиль в даному випадку може привести до істотних погрішностей в обчисленнях, оскільки у видалене приміщення енергія вібрації

переноситься хвилями цих двох типів в тій же мірі, що і вигинистими хвилями. Проходячи через стики конструкцій, що ізолюють видалене приміщення, подовжні і сдвигові хвилі трансформуються у вигинисті хвилі, чим збільшують потужність випромінюваного звуку. Помилка, що виникає в результаті ігнорування подовжніх і сдвигових хвиль, для даного фрагмента перевищує 2 дБ. Помилка неминуче зростає при збільшенні числа конструктивних елементів і їх стиків [94, 106].

Елемент блокування двох суміжних приміщень з приміщенням зального типу. Цей фрагмент (рис. 2.7.) представляє інтерес для оцінки акустичного режиму в приміщеннях будівель, суміжних зі вбудованими приміщеннями громадського призначення : магазинами, кафе, ресторанами, ательє, і тому подібне. В деяких випадках в якості приміщень зального типу можна розглядати підвали будівель, використовувані для виробничих цілей, для розміщення інженерних систем, автостоянок. Джерела шуму і вібрації можуть знаходитися як в нижньому, так і у верхніх приміщеннях. Ця схема може бути розглянута і в плані будівлі, наприклад, блокування кухні і санвузла однієї квартири з житловою кімнатою суміжної квартири.

Цей фрагмент, як і попередній, складається з 3 акустичних і 16 конструктивних підсистем. Розрахункова схема фрагмента представлена на рис. 2.8. Число невідомих значень енергії хвиль в конструкціях і приміщеннях по усіченій моделі СЕА складе 19, а по повній моделі СЕА - 51.

У приміщеннях громадського призначення часто застосовуються додаткові облицювання стін і підвісні стелі, що істотно збільшує число розрахункових елементів і порядок вирішуваних систем лінійних рівнянь. Подібна ситуація виникає і при розрахунку звукоізоляції санвузлів, що виконуються у вигляді об'ємних блоків.

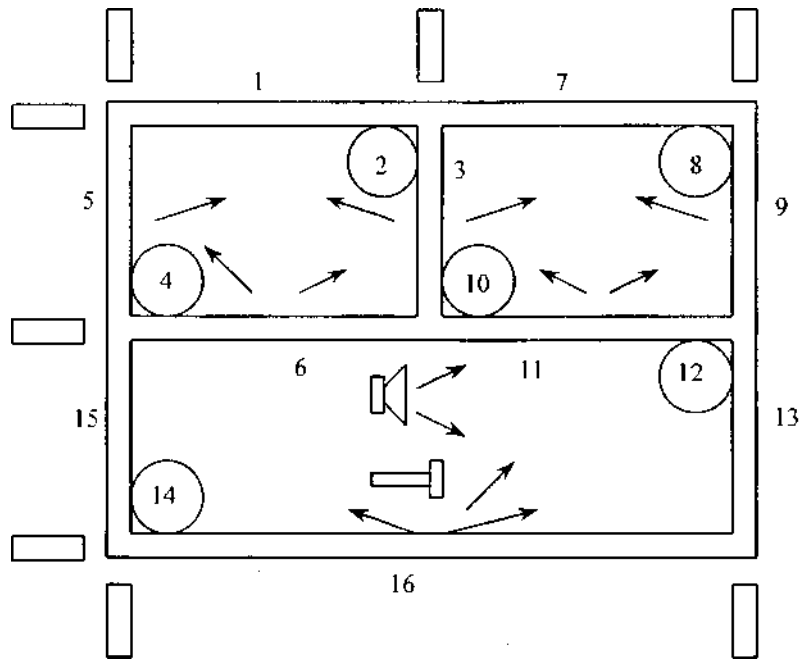


Рисунок 2.7 - Елемент блокування двох суміжних приміщень з приміщенням зального типу

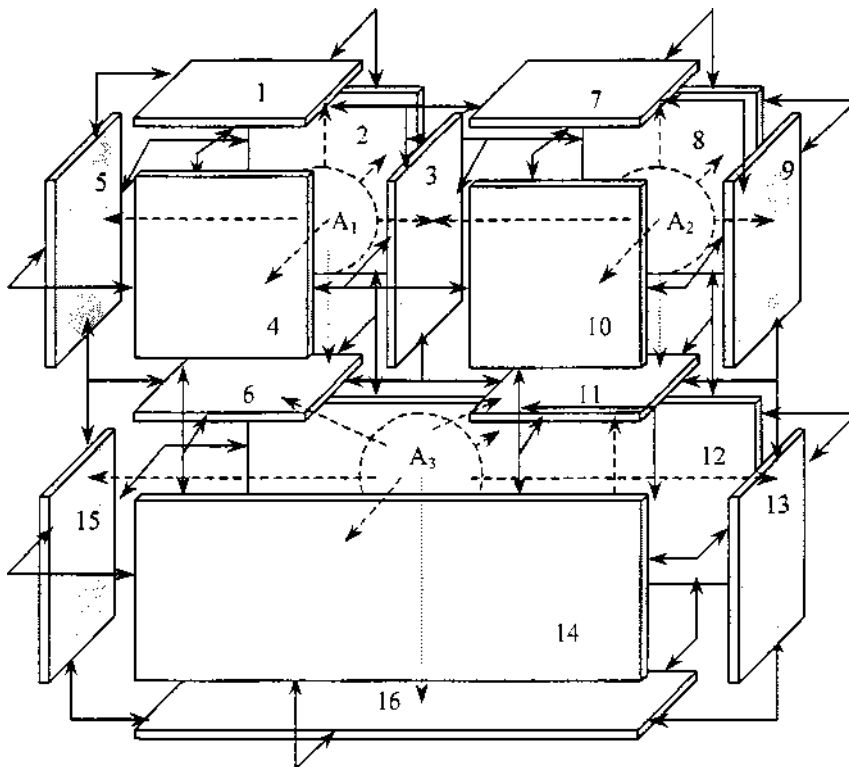


Рисунок 2.8 - Розрахункова схема елемента блокування двох суміжних приміщень з приміщенням зального типу

Розглянуті вище розрахункові фрагменти будівлі можуть бути змінені

введенням не лише додаткових конструктивних елементів і енергетичних зв'язків між ними і приміщеннями, але також введенням додаткових енергетичних зв'язків, що виникають безпосередньо між приміщеннями за наявності отворів. Конструкції, що захищають, можуть мати ділянки з різною звукоізоляцією, наприклад, внутрішня стіна з дверима. Для таких конструкцій в розрахунковій моделі слід використати два паралельні енергетичні зв'язки (рис. 2.9.).

Для розглянутих фрагментів представляє інтерес вплив зовнішнього середовища : поглинання випромінюваного фрагментом звуку або дія зовнішнього шуму на фрагмент. Але зовнішнє середовище при цьому не може бути представлене як мультимодальна система. Вимагає додаткових досліджень і питання про обчислення коефіцієнта внутрішніх втрат в зовнішньому середовищі, який в розрахунку методом СЕА повинен мати кінцеве значення, тоді як саме зовнішнє середовище повинне розглядатися як напівнескінченний простір з абсолютним звукопоглинанням.

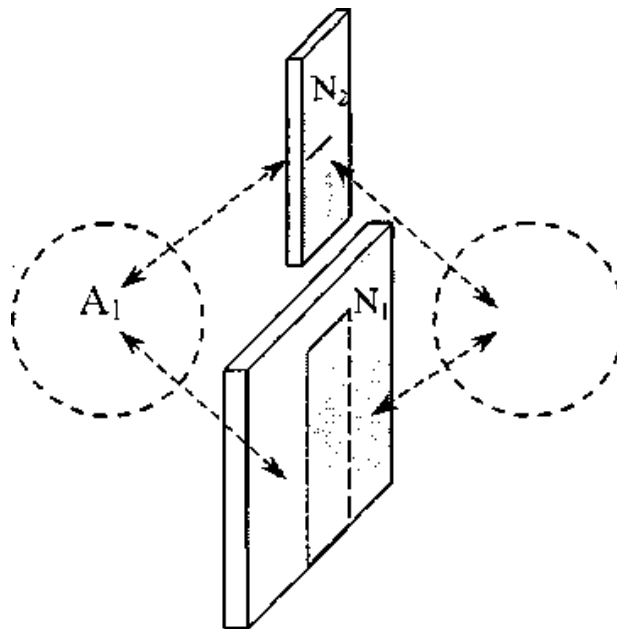


Рисунок 2.9 - Розрахункова схема енергообміну через конструкцію, що має ділянки з різною звукоізоляцією

## 2.4 Конструктивні елементи і вузли будівлі, їх розрахункові схеми

Конструктивні системи цивільних будівель характеризуються схемою розподілу між елементами функцій, що несуть і захищають, типом конструктивних елементів, технологічними ознаками. Характер конструктивної системи визначає міру акустичного взаємозв'язку кінцевих конструктивних елементів і, у результаті, вид математичної моделі будівлі по теорії статистичного енергетичного аналізу.

Найбільш поширеними конструктивними системами є безкаркасна (стінна) і каркасна системи, рідше застосовуються об'ємноблочна, оболонкова і стовбурна конструктивні системи. Можливе комбінування конструктивних систем, як, наприклад, система з неповним каркасом, в якій є зовнішні стіни, що несуть, і внутрішній каркас. Конструктивні системи характеризуються схемою розподілу навантажень по подовжніх або поперечних осях будівлі. Можлива і перехресна схема, як, наприклад, перехресно-стінна схема або схема з повним перехресним або безригельним каркасом. Забезпечення просторової жорсткості в каркасних будівлях вимагає або жорсткості вузлів елементів каркаса або застосування системи зв'язків і діафрагм жорсткості. Тому каркаси можуть бути рамними, зв'язковими і рамно-зв'язковими, що впливає на характер акустичного зв'язку конструктивних елементів. Безкаркасні будівлі також можуть мати жорсткі або податливі вузли елементів, що несуть, за умовами забезпечення їх стійкості і сейсмостійкості. Захищають елементи, що не несуть, між собою і несними конструкціями також можуть мати жорстке або податливе з'єднання. Жорстким з'єднанням вважатимемо стик конструкцій, в якому його заповнення за фізико-механичними властивостями ідентично матеріалу основних конструкцій. Податливим з'єднанням вважатимемо стик, заповнений м'якшими матеріалами - герметиками і пружними прокладками. У податливих стиках можуть бути металеві анкери, що мають кінцеві параметри подовжньої, поперечної і вигинистої жорсткості.

Характер заповнення стиків залежить від прийнятої технології зведення будівлі. У монолітних і збірно-монолітних конструктивних системах конструктивний остов будівлі має жорсткі стики елементів, що несуть, а примикання до них конструкцій, що захищають, можна розглядати як податливі. У збірних системах, наприклад, в панельних і каркаснопанельних будівлях стики елементів також можуть бути розглянуті як жорсткі або частково податливі. Оскільки віброізоляція стиків будівельних конструкцій у збірних будівлях істотно залежить від їх жорсткості, їх доцільно розглядати в загальному вигляді як податливі, використовуючи в розрахунках фізико-механические властивості матеріалів, що заповнюють стик.

Основними конструкційними матеріалами будівель є бетон, цегляна кладка, метал, дерево. Їх фізико-механическими характеристиками, використовуваними у віброакустичних розрахунках будівлі, є щільність матеріалу  $\rho$ ,  $\text{Нс}^2/\text{м}^4$  і параметри комплексного модуля пружності  $E = E_0(1+jn)$ , Па. Динамічний модуль пружності конструкційних матеріалів  $E_0$  і коефіцієнт втрат  $n$  визначаються одним з відомих методів вимірів [111] з використанням зразків, виконаних у вигляді стержнів. Фізико-механічні властивості основних конструкційних матеріалів практично не залежать від частоти завантаження, тому динамічний модуль пружності мало відрізняється від модуля пружності, виміряного при статичному завантаженні.

Разом з конструкційними, широко використовуються і ізоляційні матеріали, у тому числі тепло- звукоізоляційні матеріали і герметики. На відміну від конструкційних матеріалів, вони характеризуються низьким значенням динамічного модуля пружності, його значною відмінністю від значень, отриманих в статичному режимі завантаження, і залежністю від прикладеного статичного навантаження. Дослідженням упругодиссипативних властивостей конструкційних, а також ізоляційних матеріалів, що використовуються як звукоізоляційні прокладення в стиках конструкцій будівель.



Конструктивні вузли будівель можна класифікувати за типом конструкцій, що їх, що утворюють, і характером заповнення стиків. Конструкції будівель можна розділити на типи: стержневі (колони, ригелі), пластини (панелі, плити) і оболонки. Конструктивні вузли можуть бути жорсткими або податливими. Жорсткі стики мають заповнення тим же матеріалом, що і матеріал самих конструкцій і передають усі види переміщень в суміжні конструкції. Жорсткі стики характерні для монолітних будівель і будівель із зварним металевим каркасом.

У будівлях з мелкоразмерних і великопанельних елементів стики можуть бути і жорсткими і податливими. Міра податливості визначається вигинистою, подовжньою і сдвиговою жорсткістю усіх елементів заповнення стику. У повнозбірних будівлях, як правило, немає конструкцій стиків, таких, як шарнір або повзун, що ідеалізуються, жорсткі стики також є моделлю, що досить ідеалізується, оскільки в швах, як правило, є неоднорідності і тріщини, що істотно змінюють картину передачі сил, моментів і переміщень при проходженні хвиль. Усе різноманіття умов закріплення будівельних конструкцій в стиках може бути враховане детальним аналізом елементів і матеріалів заповнення стиків конструкцій : зачеканка розчином, металеві анкери, бетони замоноличивання стиків, герметики, пружні прокладення.

У безкаркасних будівлях основними конструктивними вузлами є стики будівельних панелей (рис. 2.10). Панелі можуть бути представлені в розрахунках як тонкі пластини, якщо для них виконується умова застосовності елементарної теорії вигинистих хвиль : товщина пластини  $h < \lambda/6$ . Будівельні панелі слід представляти як товсті плити на високих частотах, коли ця умова не виконується. Поширення мають стики здвоєних панелей, наприклад, примикання двухветвевых перегородок до стін, що несуть, і перекриттів, стики внутрішніх і зовнішніх конструкцій, якщо зовнішні конструкції складаються з двох панелей та ін. (рис. 2.11). Стики здвоєних конструкцій можуть мати пружні вставки, прокладення під плитою підлоги. Товщина панелей, зв'язаних в стиках, може бути різною. У каркасних

будівлях є стики двох типів : стики стержневих елементів, тобто колон і ригелів (мал. 2.12), і стики стержнів і пластинів (елементів каркаса і панелей стін і перекриттів). Причому стержні можуть примикати до пластин як перпендикулярно до їх площини, так і лягати в площини панелей, працюючи спільно з ними як жорсткості (мал. 2.13), що несуть елементи.

Стики можуть бути жорсткими або податливими, тому в загальному вигляді представимо їх з пружними вставками. При цьому жорсткі стики можна моделювати, вважаючи фізико-механические властивості матеріалів заповнення стиків ідентичними матеріалам основних конструктивних елементів.

Для уніфікації розрахункових моделей стиків будівлі доцільно вибрати універсальну форму стиків, як для стержневих елементів, так і для панелей. Так, для одинарних панелей універсальною формою стику можна вважати стик з 4 панелей, зв'язаних під прямим кутом через 5 пружних вставок (рис. 2.14). Представляючи жорсткість зв'язків між окремими елементами рівній нулю, можна виключити із стику окремі елементи і, таким чином, отримати T - образний, кутовий або лінійний стики. Для стиків з пружними вставками їх жорсткість характеризується модулем пружності матеріалу вставки і її геометричними характеристиками. Прирівнюючи модуль пружності матеріалу вставки до модуля пружності матеріалу основних конструкцій, можемо отримати жорсткий стик. Для стиків стержневих елементів доцільно представити два види універсальних моделей стиків : плоского і просторового. Плоский стик стержнів аналогічно стику панелей (рис. 2.14) складається з 4 стержнів і 5 пружних вставок. Просторовий стик стержнів можна представити як з'єднання з 6 стержнів прямокутного перерізу, сполучених через пружний елемент (рис. 2.15).

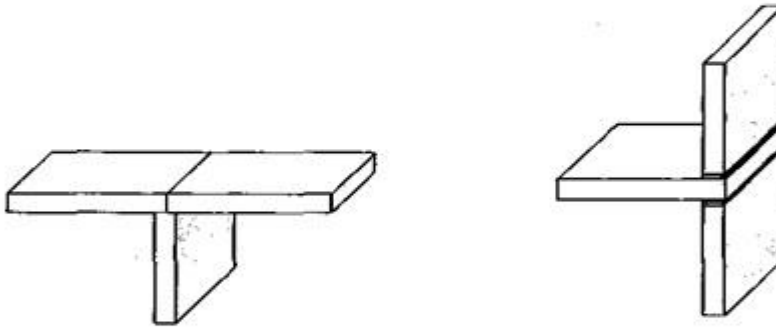
## Лінійні стики



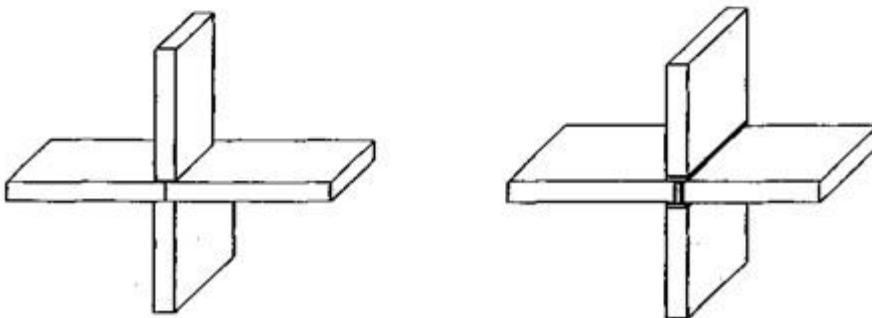
## Кутові стики



## Т-образні стики



## Хрестоподібні стики

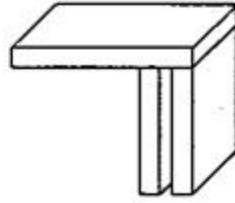


а)

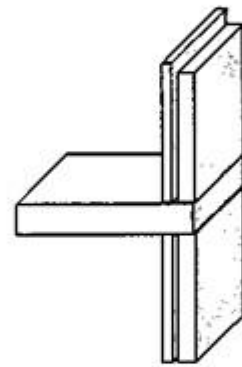
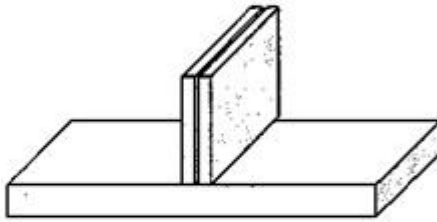
б)

Рисунок 2.10 - Стики панелей  
а) жорсткі стики; б) податливі стики

### Кутові стики



### T-образні стики



### Хрестоподібні стики

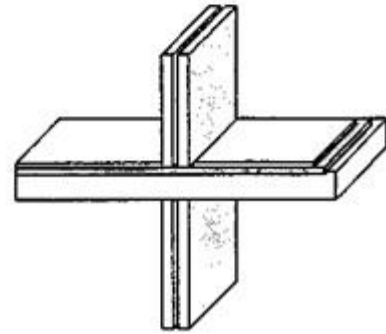
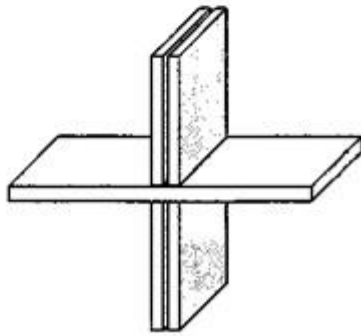


Рисунок 2.11 - Стики здвоєних панелей

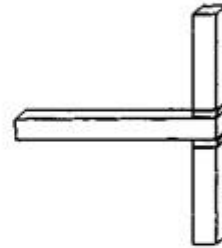
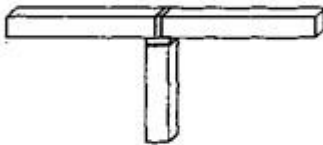
Лінійні



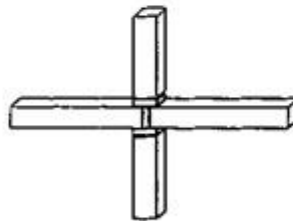
Кутові



Т- образні



Хрестові



Просторові

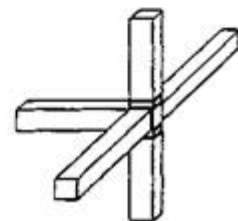
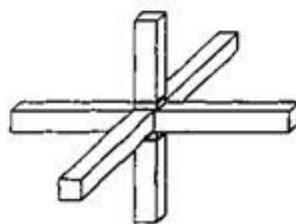
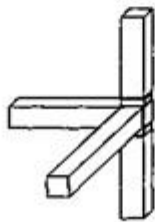
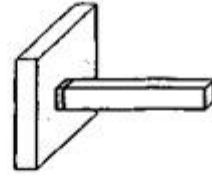
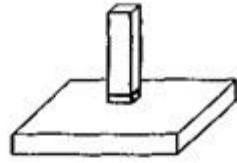
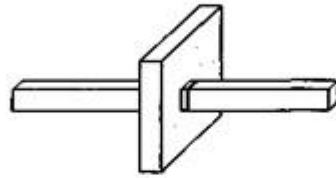
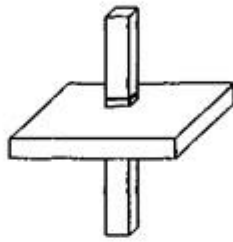


Рисунок 2.12 - Стиги стержневих елементів

Примикання стрижневого елемента до панелі

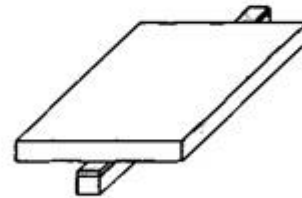
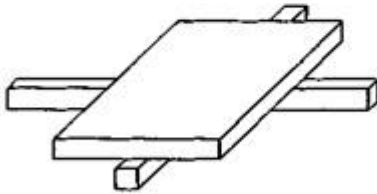


Проходження стрижневого елемента через панель



Плита з перехресними ребрами

Спирається плити на ригелі



Сполучення плит перекриття з каркасом

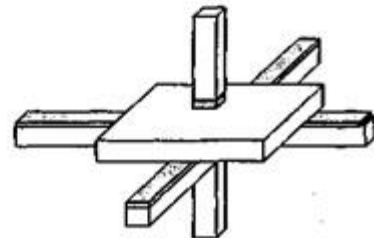
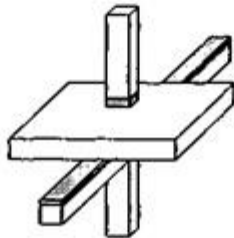


Рисунок 2.13 - Стиги стержневих елементів і панелей

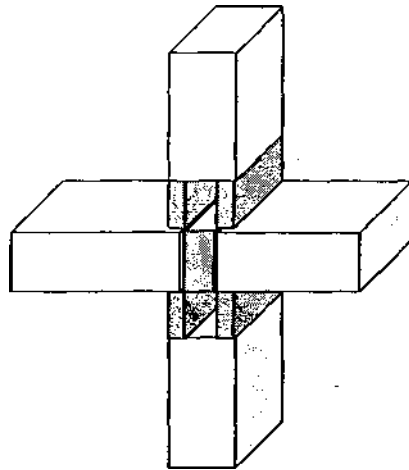


Рисунок 2.14 - Універсальна модель стику одинарних панелей

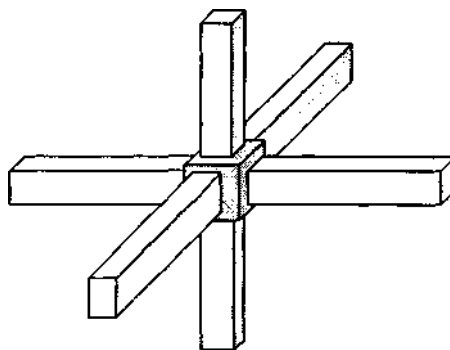


Рисунок 2.15 - Універсальна модель стику стержневих елементів

## 2.5 Висновки по другому розділу

1. Проектування звукоізоляції в цивільних будівлях вимагає системного підходу, що включає оптимізацію об'ємнопланувальних і конструктивних рішень на основі енергетичного методу розрахунку поширення звуку і вібрації у будівлях.
2. Для дослідження звуко-віброізоляції у будівлях досить розглянути деякі характерні планувальні вузли, представляючи їх у вигляді фрагмента

будівлі з описом параметрів приміщень і конструкцій, а також їх зв'язків. Розрахункова схема фрагмента показує число і взаємне розташування розрахункових елементів, їх зв'язки і тип стику конструкцій, характеристики внутрішнього поглинання звукової енергії в матеріалах конструкцій і в приміщеннях.

3. У розрахунках поширення звуку і вібрації у будівлях залежно від розміру розрахункового фрагмента можуть застосовуватися різні моделі статистичного енергетичного аналізу. Для фрагмента будівлі, що складається з одного або двох приміщень, може застосовуватися «усічена» модель, що враховує лише енергію вигинистих хвиль в конструкціях. Для фрагмента будівлі, що складається з трьох або більше приміщень, слід використати «повну» модель СЭА, енергію вигинистих, подовжніх і сдвигових хвиль, що враховує, в конструкціях.
4. Розрахунок коефіцієнтів проходження енергії хвиль через стики конструкцій доцільно здійснювати на основі деяких універсальних моделей стиків, що включають досить широке різноманіття можливих конструктивних рішень. У загальному випадку слід розглядати стики як податливі, такі, що мають заповнення матеріалом з довільними параметрами жорсткості. Така загальна модель дозволяє розраховувати і стики з «м'якими» прокладеннями або герметиками і стики з жорсткими анкерами, заповненням або приливами з розчину.



## РОЗДІЛ 3

### ПРУЖНІ І ДИССИПАТИВНІ ВЛАСТИВОСТІ КОНСТРУКЦІЙНИХ І ЗВУКОІЗОЛЯЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

Для розвитку точних методів розрахунку поширення шуму і звукової вібрації у будівлях необхідно мати дані про пружні і дисипативні властивості конструкційних і ізоляційних матеріалів, вживаних у будівництві. Пружні властивості конструкційних матеріалів практично однаково проявляються в статичному і динамічному режимах завантаження. Вони досить добре вивчені, і тому значення модуля пружності бетонів, сталі, деревини наводяться у багатьох довідниках. Існує лише необхідність в систематизації цих даних для зручності пошуку при виконанні віброакустичного розрахунку будівлі.

#### **3.1 Пружні і дисипативні властивості конструкційних матеріалів**

Для виміру динамічного модуля пружності і коефіцієнта втрат конструкційних матеріалів застосовуються методи, засновані на збудженні в конструкційному матеріалі малої напруги на звукових частотах. В якості зразків виготовляються стержні, рідше за пластину, з випробовуваного конструкційного матеріалу. Найбільше поширення отримали резонансний і ревербераційний методи, описані в роботах [47, 48]. Результати, отримані з їх допомогою, приведені в перерахованих роботах і в роботах [10,11]. Характеристики конструкційних матеріалів представлені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1. - Фізико-механічні властивості конструкційних матеріалів

Найменування матеріалу	Щільність $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Модуль пружності $E$ , Н/м <sup>2</sup>	Швидкість подовжніх хвиль $c$ , м/с	Коефіцієнт втрат $n$
<b>1. Бетони:</b>				
Важкий	2300	$26 \cdot 10^9$	3400	$4 \cdot 8 \cdot 10^{-3}$
	2250	$29,8 \cdot 10^9$	-	0,007
	2300	-	3500	0,006
Залізобетон	2400	-	4500	-
Легкий (комірчастий)	1300	$3,8 \cdot 10^9$	1700	0,015
	600	$2,0 \cdot 10^9$	1700	0,01
	800	-	1400	0,01
	700	-	1700	0,01
Асбобетон	2000	$28 \cdot 10^9$	3700	0,07-0,02
Керамзитобетон на кварцевому піску	1530	$12,4 \cdot 10^9$	-	0,0092
Шлакопемзобетон на кварцевому піску	1860	$17,7 \cdot 10^9$	-	0,0104
Шлакопемзобетон	2000	-	3200	-
Шлакобетон	1600	-	4000	-
Гіпсобетон	1300		4000	

Продовження таблиці 3.1.

Найменування матеріалу	Щільність $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Модуль пружності $E$ , Н/м <sup>2</sup>	Швидкість подовжніх хвиль $C_b$ , м/с	Коефіцієнт втрат $n$
2. Гіпс	1200	$7,0 \cdot 10^9$	2400	0,006
	960	-	2400	0,006
	1200	-	2200	0,005-0,01
	1200	-	2500	-
3. Цегляна кладка	1900	$16,0 \cdot 10^9$	3400	$4 \cdot 8 \cdot 10^{-3}$
	2200	$16,0 \cdot 10^9$	3400	$4 \cdot 8 \cdot 10^{-3}$
	2000	-	2900	0,01
	2000	-	2200	0,015
	1500	-	2750	-
	1400	-	3650	-
	4. Сталь	7850	$210 \cdot 10^9$	
	7800	-	5200	-
	7800	-	5100	менше $10^{-4}$
	7800	$210^9$	5100	$0,2 \cdot 3 \cdot 10^{-4}$
5. Дерево: Сосна	550		1450	
Ялина, ялиця	400-700	$1 \cdot 5 \cdot 10^9$	2500	0,008
Дуб	700-1000	$2 \cdot 10 \cdot 10^9$	1500-3500	0,01
Березова фанера	600	$5,4 \cdot 10^9$	3000	0,013
	800	$3,4 \cdot 10^9$	-	0,023
Бакелізована фанера	1050	$5,4 \cdot 10^9$	-	0,016
Деревностружкові плити	600-700	$4,6 \cdot 10^9$	2700	0,01-0,03

### 3.2 Пружні і дисипативні властивості звукоізоляційних матеріалів

До числа звукоізоляційних матеріалів відносять волокнисті і пористі матеріали на основі природних і полімерних композицій, а також гумотехнічні матеріали і вироби [50]. Як відомо, пружні властивості «м'яких» матеріалів по-різному проявляються в статичному і динамічному режимах випробування. Пояснюється ця обставина тим, що після додатка навантаження необхідно деякий час для того, щоб величина відносної деформації таких матеріалів стабілізувалася [45]. Тому розрізняють статичний  $E_{ст}$  динамічний  $E_0$  модулі пружності матеріалів, визначувані в режимах статичного і циклічного завантаження. Для ряду звукоізоляційних матеріалів  $E_0$  перевищує  $E_{ст}$  у декілька разів [50], причому ця різниця залежить від структури матеріалу і статичного навантаження, що прикладається. При циклічному завантаженні частина енергії деформації скелета матеріалу розсіюється і переходить в тепло. Ця властивість матеріалу характеризується коефіцієнтом втрат  $n$ . Наявність втрат в матеріалі враховується комплексним модулем пружності  $E = E_0(1 + n)$ .

Статичне навантаження на звукоізоляційний матеріал залежить від характеру його використання у будівлі [50]. У міжповерхових перекриттях на суцільний шар звукоізоляційного матеріалу діє навантаження 2...4 кПа, на прокладення у вигляді смуг - 5... 10 кПа. При тому, що спирається плити підлоги по контуру на плиту перекриття, що несе, навантаження на прокладення досягає 15...20 кПа. У горизонтальних стиках елементів, що не несуть, наприклад, під основою перегородок, санкабин, а також під опорними плитами машин і агрегатів інженерного устаткування навантаження досягає 30...50 кПа. У горизонтальних стиках несних конструкцій будівель середньої і підвищеної поверховості напруги досягають 5 МПа і більше.

### 3.3 Пружні властивості звукоізоляційних матеріалів у статичному режимі завантаження

Вимір статичного модуля пружності матеріалів не вимагає складної методики і апаратури. Тому деякі дослідники [9, 17] для оцінки звукоізоляційних властивостей матеріалів прокладень при малих навантаженнях вимірювали  $E_{cm}$ .

Дослідивши процес наростання відносної деформації прокладень в часі, Е.А. Алексєєв зробив важливий висновок про те, що прокладення практично повністю піддаються обтисканню вже в процесі монтажу і подальших нерівномірних осідань конструкцій в стиках бути не повинно. Отримані значення  $E_{cm}$  для ряду ізоляційних матеріалів виявилися на 2...3 порядку нижче, ніж для залізобетону ( $E = 26 \cdot 10^3$  (МПа) і при навантаженнях в 5... 10 МПа склали 25... 120 МПа, що дає підстави припускати значну віброізолюючу здатність стиків з прокладеннями в порівнянні з жорсткими стиками.

Дані про статичний модуль пружності дозволяють оцінити деформативні властивості матеріалу, визначити його товщину під навантаженням.

На початку 80-х років автором справжньої роботи, у рамках дослідницької програми, спрямованої на створення сейсмостійких конструктивних систем будівель з гнучкими стиками, були досліджені деякі матеріали, що мають достатню жорсткість для застосування в горизонтальних стиках несних конструкцій будівлі. Досліджувалися наступні матеріали прокладень, придатні для цієї мети :

- 1) транспортерна стрічка;
- 2) пресовані лавсанові волокна;
- 3) деревноволокниста ізоляційна плита (ДВИП) марки М- 4 ;
- 4) технічне бавовняне сушарне сукно;
- 5) технічне синтетичне сушарне сукно;

б) синтетична сітка.

7) Вибір перерахованих матеріалів пояснюється тим, що ці матеріали можуть застосовуватися в якості ізолюючих прокладень в горизонтальних стиках стін будівель, що несуть, оскільки вони мають хороші експлуатаційні властивості і мають достатні обсяги виробництва або відходів промисловості. Кожен матеріал був представлений партією з трьох зразків розмірами 90 x 90 мм і заввишки до 12 мм.

8) Для статичних випробувань матеріалів використовувався гідравлічний прес, що утримував навантаження тривалий час, і дві мессури (індикатори переміщення годинного типу) з ціною ділення 0,01 мм. Статичний модуль пружності  $E_{cm}$  визначається за результатами випробування зразків на стискування з діаграм «напруга - деформація» як тангенс кута нахилу ділянки діаграми до осі абсцис :

$$E_{cm} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon}, \quad (3.1)$$

де  $\Delta\sigma$  - приріст тиску на прокладення в циклі завантаження, МПа;

$\Delta\varepsilon$  - зміна відносної деформації зразка в циклі завантаження.

Методика виміру статичного модуля пружності передбачає послідовне завантаження зразка, витримку його під навантаженням впродовж 10 хвилин і зйомку переміщень одного кінця зразка відносно іншого по лівій і по правій мессурам. При цьому за свідченнями манометра пресу оцінюється тиск на прокладення, а за свідченнями мессур - абсолютна і відносна деформація зразка. За описаною методикою були виміряні значення  $E_{cm}$  перерахованих матеріалів при навантаженнях до 10 МПа.

Матеріали прокладень, неоднорідні по своїй структурі дають істотний розкид результатів вимірів, що вимагає статистичної обробки. Результати вимірів  $E_{cm}$  були оброблені методами кореляційно-регресійного аналізу. Перевірка гіпотези нормальності розподілу вибіркового даних робилася по співвідношенню:

$$\frac{R}{\sigma_y} \min \leq \frac{R}{\sigma_y} \leq \frac{R}{\sigma_y} \max, \quad (3.2)$$

де  $R$  - розмах варіювання випадкової величини (у нашому випадку  $E_{cm}$ );

$\sigma_y$  - середньоквадратичне відхилення;

$\frac{R}{\sigma_y} \min(\max)$  - критические значення соотношения, при вероятности

ошибки  $p = 0,05$ .

В якості апроксимуючої залежності Їсть

$$E_{cm} = a \cdot \sigma^2 + b \cdot \sigma + c, \quad (3.3)$$

де  $a, d, c$  - коефіцієнти регресії;

$\sigma$  - тиск на прокладення, МПа.

Значення кореляційних стосунків обчислюються за формулою:

$$\eta = \sqrt{\frac{\delta_x^2}{\sigma_y^2}}, \quad (3.4)$$

де  $\sigma_y^2 = \frac{\sum (y - \bar{y})^2}{n}$  загальна дисперсія;

$\delta_x^2 = \frac{\sum (y_x - \bar{y})^2}{n}$  дисперсія результативної ознаки (у нашому випадку  $E_{cm}$ )

$y$  - експериментальні значення  $E_{cm}$ ;

$\bar{y}$  - середнє з експериментальних значень  $E_{cm}$ ;

$y_x$  - теоретичні значення  $E_{cm}$ , вчислені по формулі (3.3);

$n$  - число східців завантаження.

Значення  $n$  свідчать про наявність досить тісного кореляційного зв'язку між величинами  $E_{cm}$  і  $\sigma$ . Значущість рівнянь регресії перевірялася за допомогою критерію Фишера  $F$  :

$$F = \frac{\sigma_y^2}{\sigma_{y.ост}^2} \geq F_m, \quad (3.5)$$

де  $\sigma_{y,ocm}^2$  - загальна дисперсія фактичних значень залежної змінної;

$$\sigma_{y,ocm}^2 = \frac{\sum (y - y_x)^2}{n - 2}$$

- залишкова дисперсія, що вказує на міру розсіювання фактичних значень у відносно  $y_x$

$F_m$  - табличне значення критерію Фишера при вірогідності помилки  $p=0,05$ .

Розрахунок параметрів рівнянь регресії, кореляційних стосунків, статистичних оцінок і критерію Фишера здійснювався по стандартних і спеціально для цього розробленим автором комп'ютерним програмам. Регресійні залежності  $E_{cm} = f(\sigma)$  для досліджених матеріалів представлені в таблиці. 3.2. Апроксимуючі залежності знайдені для меж зміни статичного навантаження від 0,1 до 10 МПа.

Таблиця 3.2 - Рівняння регресії  $E_{cm} = f(\sigma)$  для матеріалів прокладень

Найменування матеріалу	Рівняння регресії
Транспортерна стрічка	$E_{cm} = - 10,16\sigma^2 + 22,20\sigma + 11,4$
Пресовані лавсанові волокна	$E_{cm} = - 2,13\sigma^2 + 34,70\sigma + 2,13$
ДВИП М- 4	$E_{cm} = 0,197\sigma^2 + 1,27\sigma + 3,01$
Технічне бавовняне сушарне сукно	$E_{cm} = -0,315\sigma^2 + 7,70\sigma + 2,76$
Технічне синтетичне сушарне сукно	$E_{cm} = - 0,415\sigma^2 + 8,32\sigma + 2,15$
Синтетична сітка	$E_{cm} = -0,77\sigma^2 + 19,10\sigma + 18,52$

На рис. 3.1 представлені графіки залежності  $E_{cm} = f(\sigma)$  для вказаних матеріалів. Як видно з графіків, для усіх матеріалів (окрім ДВИП) ріст статичного модуля пружності при навантаженні 4...6 МПа і вище



сповільнюється, що цілком узгоджується з результатами Е.А. Алексєєва [2]. При максимальних навантаженнях, які можуть випробовувати прокладення в стиках будівлі (3...5 МПа), статичний модуль пружності для усіх матеріалів не перевищує 100 МПа.

На етапі статичних вимірів пружних властивостей матеріалів прокладень був також досліджений процес загасання абсолютних деформацій прокладень в часі. Методика подібних експериментів також описана в роботі [2]. Зразки матеріалів, висота яких була значно менше розмірів в плані, рівномірно завантажувалися до досягнення в них напруги в 2,5 МПа або 5 МПа. Тиск підтримувався постійним, а опади знімалися з мессур впродовж 30...60 хвилин. Результати вимірів представлені на рис. 3.2.

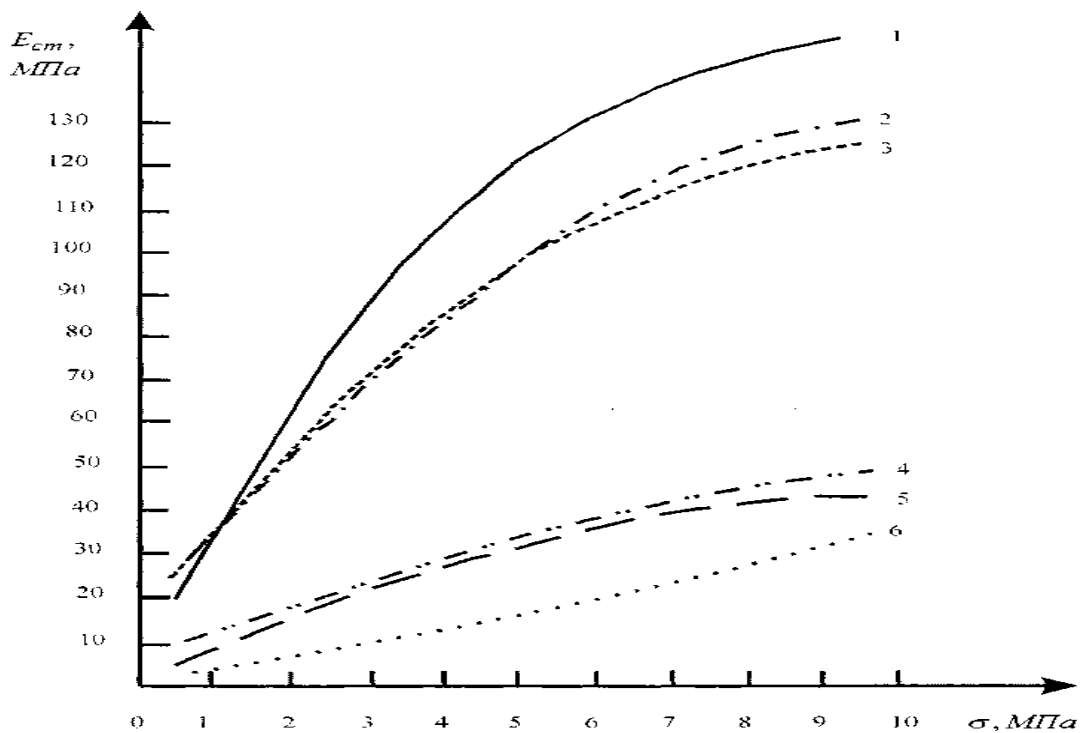


Рисунок 3.1 - Апроксимуючі залежності  $E_{cm} = f(\sigma)$  :

- 1 - пресоване лавсанове волокно;
- 2 - синтетична сітка;
- 3 - транспортерна стрічка;
- 4 - технічне бавовняне сушарне сукно;
- 5 - те ж, синтетичне;
- 6 - деревноволокниста ізоляційна плита ДВИП М- 4.

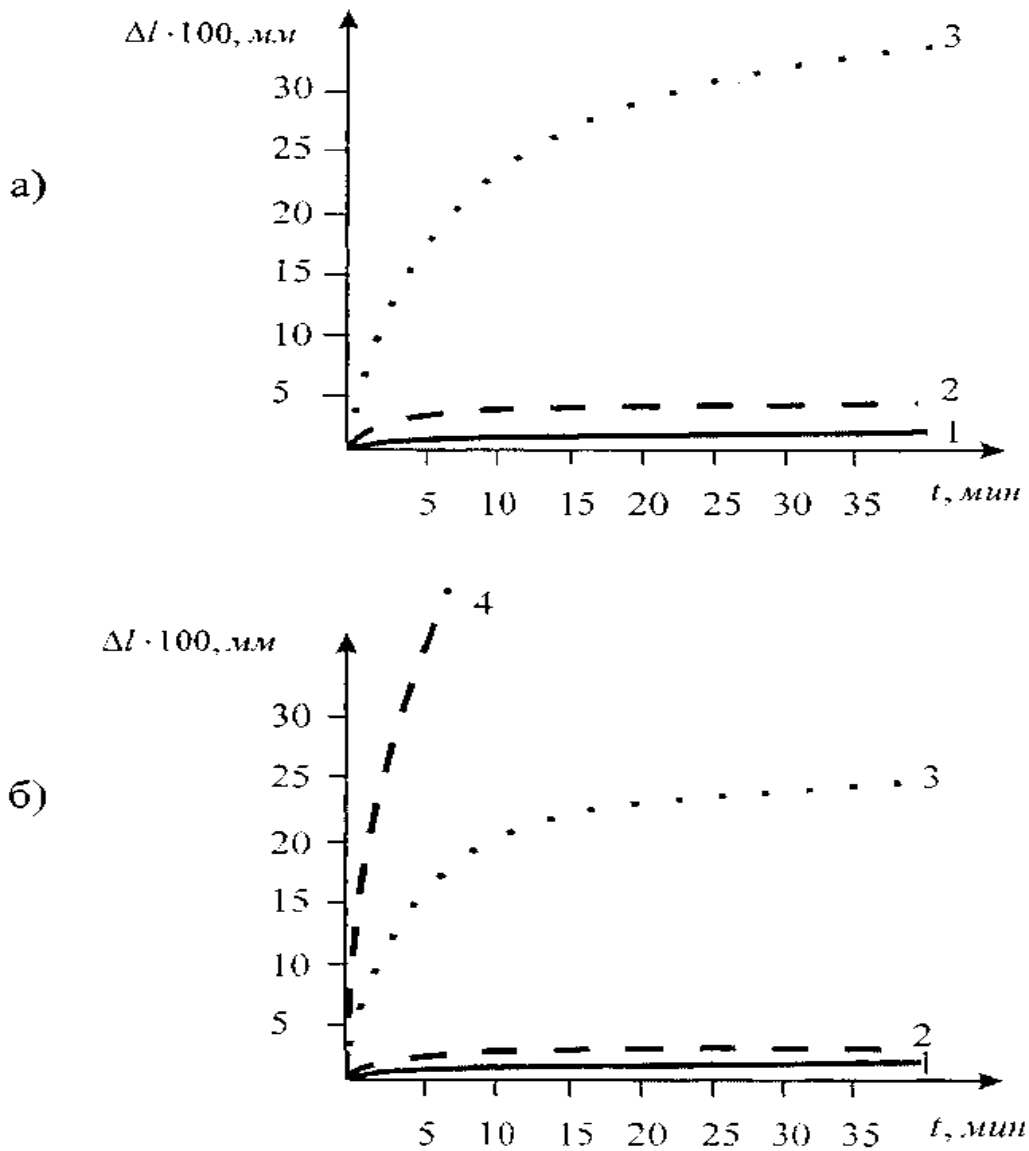


Рисунок 3.2 -Зависимости абсолютних деформацій зразків від часу при навантаженнях 2,5 МПа (а) і 5 МПа (б) :

- 1 - пресовані лавсанові волокна;
- 2 - синтетична сітка;
- 3 - деревноволокниста ізоляційна плита ДВИП М- 4;
- 4 - руберойд

Аналізуючи графіки, можна зробити висновок про те, що обтискання матеріалу після подання навантаження в основному відбувається за перші 5... 10 хвилин. Надалі приріст абсолютної деформації зразків зменшується практично до нуля. Це означає, що значення статичного  $E_{cm}$ ,  $a$ , отже, і динамічного  $E_d$  модулів пружності матеріалів стабілізуються, і подальшого приросту цих величин не відбувається. На підставі цих результатів можна припустити, що прокладення за багато років служби не втратять своїх віброзахисних властивостей внаслідок деформації повзучості.

Окрім вказаних вище матеріалів, була досліджена можливість застосування битумизированих покрівельних матеріалів в якості прокладень в умовах великих статичних навантажень. При випробуванні зразків руберойду стабілізації (припинення приросту абсолютних деформацій) не спостерігалось (крива 4, рис. 3.2), зразки розтікалися, втрачаючи форму. Очевидно, що ці матеріали, незважаючи на свої хороші пружно-дисипативні властивості при малих навантаженнях, не можуть бути застосовані в тяжких умовах завантаження.

### **3.4 Динамічні властивості звукоізоляційних матеріалів при малих і великих статичних навантаженнях**

Статичний модуль пружності матеріалів прокладень не відбиває роботи матеріалу при його динамічному завантаженні в звуковому діапазоні частот. Для розрахунків звуко- і віброізоляції у будівлях потрібні динамічні характеристики звукоізоляційних матеріалів при дії розрахункових статичних навантажень. Нині дані про комплексний модуль пружності матеріалів використовуються переважно для розрахунків віброізоляції машин і механізмів, звукоізолюючої здатності міжповерхових перекриттів. Цим пояснюється те, що існуючі методи вимірів  $E_d$  і  $n$  передбачають малі статичні навантаження на зразки - до 0,1 МПа і нижче. Для дослідження динамічних характеристик матеріалів прокладень в широкому діапазоні

статичних навантажень потрібно відповідну методику вимірів, викладену нижче.

Для випадку малої статичної напруги методи вимірів досить розроблені в працях И.И. Клюкина, Г. С. Росина, А.И. Герасимова [17], В. І. Верховского [16], Д.Б. Ващук [14], С. А. Костарева [47] і інших авторів. У основу методів покладені виміри механічного опору (імпедансу) зразків матеріалів, комплексного перепаду параметрів вібрації (передатній функції), резонансної частоти коливань вимірювальної системи, що включає досліджувані зразки.

Г. С. Росиним було досліджене вплив форм зразків на результати вимірів і показаний вплив подовжніх хвильових процесів в зразку. Це дозволило виконувати виміри з більшою точністю в діапазоні частот до 3200 Гц. Проте, результати вимірів  $E_{\delta}$  і  $n$  одних і тих же матеріалів, отримані перерахованими авторами, не завжди однозначні. Особливо спірним залишилося питання про частотну залежність динамічних характеристик. Т. Притц детально розглянув причини протиріч в результатах, отриманих різними авторами при використанні методу імпедансу і методу передатної функції. У роботах їм показано, що для отримання коректних результатів необхідно задовольнити ряд вимог до забезпечення розрахункових граничних умов, до точності вимірювальної апаратури. Т. Притцем отримані дані про  $E_{\delta}$  і  $n$  деяких звукоізоляційних матеріалів. Результати його роботи показують, що для більшості досліджених матеріалів прокладень динамічний модуль пружності слабо залежить від частоти, а коефіцієнт втрат в середньому на порядок нижче значень, отриманих іншими авторами. Деякі значення динамічних характеристик звукоізоляційних матеріалів за даними ряду дослідників приведені в таблицю. 3.3.

Таблиця 3.3 - Динамічні властивості деяких звукоізоляційних матеріалів

Найменування матеріалу	Щільність $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Статич. Навантаження $\sigma$ ,	Модуль пружності $E_0$ , кПа	Коефіцієнт втрат $n$
1. Мінерало-ватні плити	80-300	-	140-300	0,1
	50-100	1-6	150-680	-
	150	2	150	0,04
	150	1-50	200-5000	0,08-0,4
	140	0-4	100-400	0,03-0,05
2. Деревоволокнисті плити	140-200	0,5-40	110-5000	0,1
	200	3,0	162	0,01
3. Волосяний повсть	400	3,0	4200	0,23
	400	10-70	2000-9000	0,23
4. Пінополіуретан (поролон)	40	0,5-3	320-550	0,22
5. Пінопласти: ПХВ-Э стиропор пінополістирол поліізобутилен	170	2-15	575-740	0,85
	10-20	0-10	300-30000	-
	40-150	50-250	5000-24000	-
	-	-	6000	2,0
7. Гуми: жорстка  поризована	-	-	2000	1,0
	950	100	3200	-
	720	2,0	2570	0,15
	530	2-40	650-800	-
	420	2,0	320	0,13
	110	0,5	30	0,04

У 1980 р. був стандартизований в СРСР досить простий і надійний метод вимірів - резонансний. ГОСТ 16297-80 «Матеріалів звукоізоляційних і звукопоглинальних. Методи випробувань» [18] передбачає визначення модуля пружності по вимірній частоті резонансу. У ній регламентується форма зразків, що не вимагає поправок на хвилеві процеси в них. Відповідно до СНиП II - 12-77 «Захист від шуму» статичні навантаження на зразок при вимірах передбачаються не більше 0,01 МПа.

### 3.5 Методика виміру динамічних характеристик звукоізоляційних матеріалів

Виміри при малих статичних навантаженнях (до 0,1 МПа) можна робити на стандартному вимірювальному стенді [18]. Вимірювальний стенд для дослідження характеристик  $E_0$  і  $n$  вимагає наступних приладів: звуковий генератор, що має блок автоматичного регулювання рівня вихідного сигналу; підсилювач потужності; частотомір і електродинамічний збудник коливань (ЕДВ). Середньоквадратичні значення коливальних прискорень вимірюються за допомогою п'єзоелектричних акселерометров, підключених до вібровимірників, причому вихід одного з віброметрів пов'язаний зворотним зв'язком з входом генератора. Конструктивна і розрахункова схеми стенду представлені на рис. 3.3.

З розрахункової схеми стенду можна записати рівняння рівноваги гармонійних зусиль, діючих на пригруз масою  $M$  (множник  $e^{j\omega t}$  пропущений) :

$$M \cdot \ddot{x}_2 + k \cdot (x_2 - x_1) = 0, \quad (3.6)$$

де  $\ddot{x}_2$  - амплітуда віброприскорення пригруза,  $m/s^2$ ;

$x_2$  - амплітуда зміщення пригруза,  $m$ ;

$x_1$  - амплітуда зміщення платформи ЕДВ,  $m$ ;

$M$  - маса пригруза,  $N \cdot s^2/m$ ;

Зразки мали квадратну форму основи із стороною 30 мм і висота не більше 25 мм і набиралися з одного або декількох шарів. Одночасно випробовувалися 3 зразки з партії в 9 зразків.

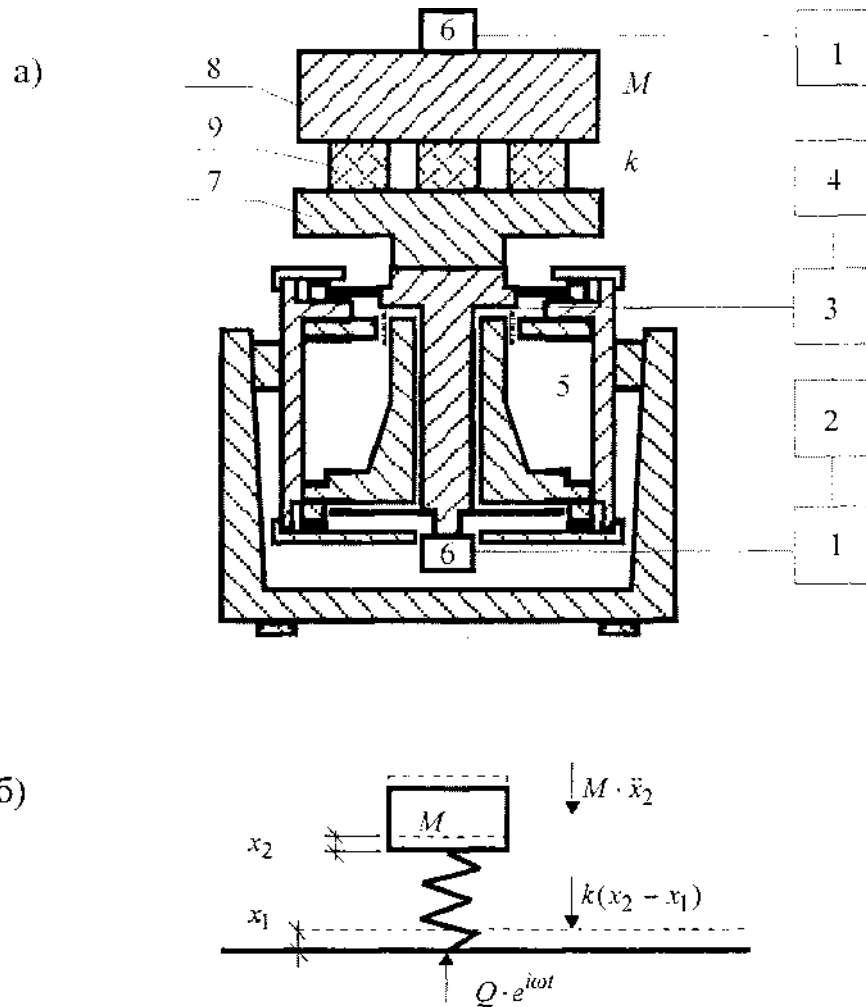


Рисунок 3.3 - Конструктивна, електрична (а) і розрахункова (б) схеми стенду для виміру  $E_0$  і  $\nu$  при малих статичних навантаженнях:

1 - віброметр; 2 - звуковий генератор; 3 - підсилювач потужності; 4 - частотомір; 5 - електродинамічний збудник коливань; 6 - акселерометр; 7 - платформа ЕДВ; 8 - пригруз; 9 - зразки

Процес вимірів полягав в знаходженні резонансної частоти  $f$ , на якій амплітуда  $\ddot{x}_2$  - максимальна, визначенні цієї частоти частотоміром, а також вимірі амплітуд віброприскорень  $\ddot{x}_1$  і  $\ddot{x}_2$ . Було чотири пригруза вагою 1, 2, 4 і 8 кг, за допомогою яких навантаження мінялося від

1 до 15 кг Окрім зразків вказаного розміру, досліджувалися зразки матеріалів з квадратною основою 90 мм x 90 мм і заввишки не більше 10 мм під навантаженням. В цьому випадку, окрім вказаного способу створення статичного навантаження на зразок, використовувалися циліндричні шпильки діаметром 5 або 10 мм, які поміщалися між зразком і пригрузами у кількості 3 штук. Проте, результати, отримані за допомогою шпильок, не цілком узгоджувалися з результатами, отриманими за стандартною методикою, оскільки в цьому випадку вимірювався об'ємний модуль пружності, перейти ж до модуля Юнга не представлялося можливим внаслідок того, що коефіцієнт Пуассона матеріалів точно не визначений.

Виміри при великих статичних навантаженнях. Як відомо, застосування звукоізоляційних прокладень є найбільш ефективним заходом по зниженню структурного шуму. Проте, діапазон статичних навантажень на прокладення в стиках конструкцій (до 5... 10 МПа) вимагає модернізації методики випробування матеріалів.

Виміри динамічної жорсткості зразків гуми і пробки при високих статичних навантаженнях (до 1,2 МПа) проводили Р. Джексон, А. Кинг і С. Мэджер (Jackson R.S., King A.J., Maguire C.R.). Метод виміру - імпеданс, статичне навантаження задавалося гвинтовим пристроєм, а вимірювалася за величиною стискування калібрувальної пружини. Недолік розробленого ними стенду, що обмежує його точність і величину статичного навантаження, що прикладається, полягає в тому, що в розрахункову схему необхідно включати жорсткість підвісок збудника коливань і калібрувальної пружини. Результати експерименту продемонстрували інтенсивний ріст подовжньої динамічної жорсткості зі збільшенням статичного навантаження.

Обмеженість описаної вище, а також стандартної методики ГОСТ 16297-80 полягає в тому, що вітчизняні і зарубіжні електродинамічні збудники коливань мають недостатню потужність для вимірів з пригрузами великої маси. Обмеження по масі пригруза викликане також і тим, що навантаженню піддаються не лише зразки, але і підвіски ЕДВ. Недоліком є і



те, що пригруз на резонансній частоті здійснює коливання з великою амплітудою віброприскорення (до  $3 \text{ м с}^{-2}$ ), отже, на зразки діє не лише статичне, але і динамічне зусилля з боку пригруза, що не враховується стандартною методикою.

Позбавитися від перерахованих обмежень і забезпечити роботу вимірювального стенду при великих статичних навантаженнях (від 0,1 до 10 МПа) можна, здійснивши принцип розділення статичного і динамічного дій на зразки. Це дозволяє розвантажити підвіску електродинамічного збудника коливань від статичного навантаження, що прикладається, а саме статичне навантаження створювати не пригрузами, що викликають динамічні перевантаження зразків, а пресовим устаткуванням.

Конструктивна, електрична і розрахункова схеми стенду для виміру динамічного модуля пружності  $E_0$  і коефіцієнта втрат  $n$  для матеріалів прокладень при дії статичних навантажень до 10 МПа представлені на рис. 3.4. Статичне навантаження задавалося і витримувалося на кожному ступені завантаження за допомогою гідравлічного пресу УМ- 5. Гармонійне збудження зразків робилося ЕДВ. Електрична схема не відрізнялася від описаної вище. Принципова відмінність цієї установки від стандартної полягає в тому, що роль пригруза тут грає сталеву склянку з кришкою, усередині якої закріплений на шпильці акселерометр типу 4321 (трьохкоординатний). Циліндр має досить товсті стінки (15 мм) і на частотах до 3000 Гц здійснює коливання як зосереджена маса, що було з'ясовано на підставі порівняння амплітуди і фази коливань акселерометров, прикріплених до дна і кришки циліндра.

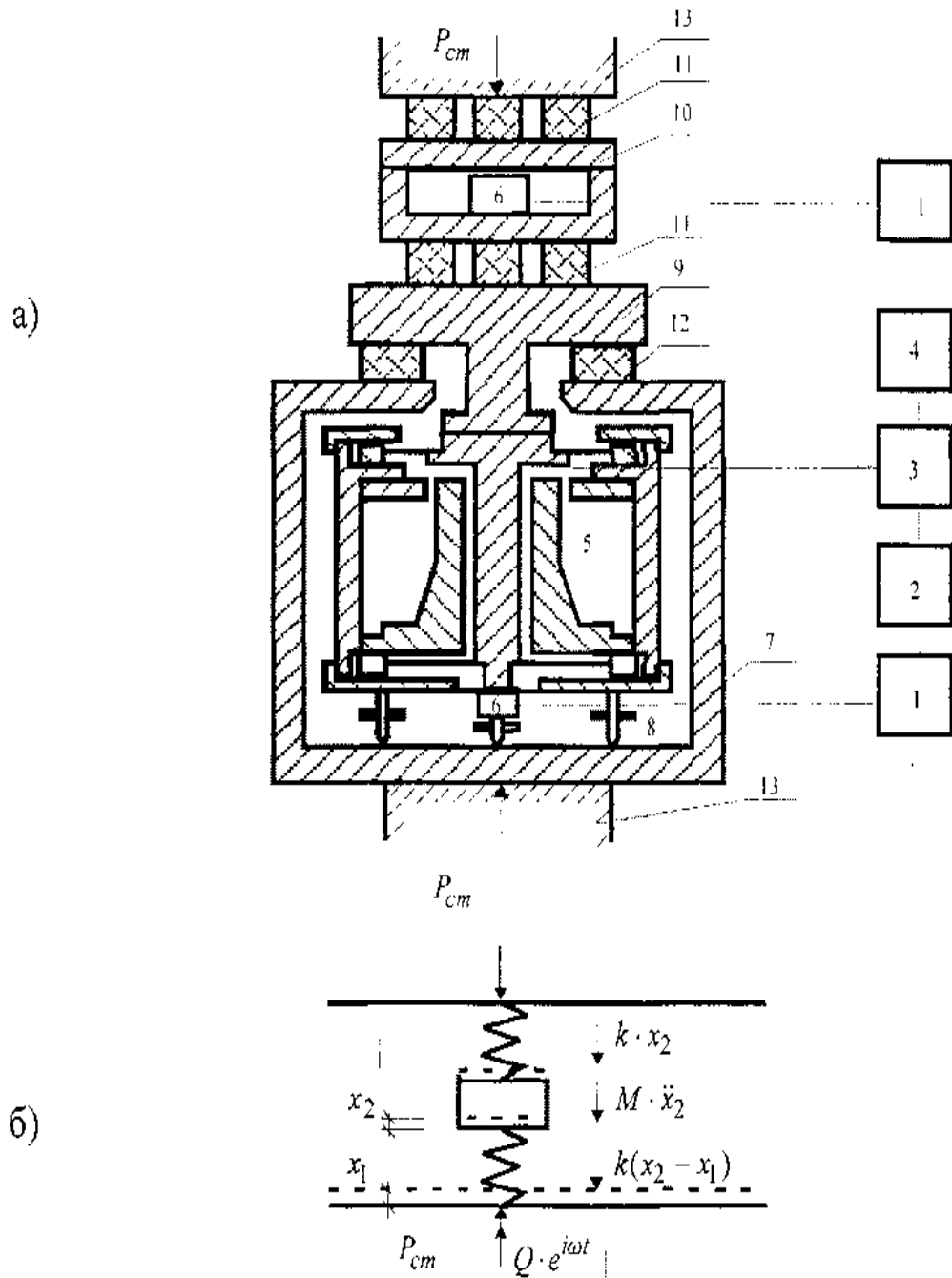


Рисунок 3.4 - Конструктивна, електрична (а) і розрахункова (б) схеми

стенду для виміру  $E_0$  і  $n$  при великих статичних навантаженнях:

1 - вібрметр; 2 - звуковий генератор; 3 - підсилювач потужності; 4 - частотомір; 5 - ЭДВ; 6 - акселерометр; 7 - товстостінний призматичний короб; 8 - настановні гвинти; 9 - платформа; 10 - обойма акселерометра масою  $M$ ; 11 - зразки; 12 - пружні опорні вставки; 13 - платформа пресу.

Електродинамічний збудник коливань був поміщений в жорсткий і масивний сталевий короб призматичної форми. Нижня грань короба жорстко кріпилася до платформи преса, верхня мала отвір для пропуску штока. Бічні грані короба мали отвори для доступу до настановних гвинтів, за допомогою яких регулювалося положення ЕДВ в процесі статичного завантаження. Шток чотирма гвинтами кріпився до рухливої системи ЕДВ, його верх розширювався до діаметру 160 мм і служив платформою для зразків. Під платформу симетрично підкладалися пружні опорні вставки з транспортерної стрічки; їх жорсткість не впливала на результати вимірів, оскільки платформа ЕДВ здійснювала коливання з постійною амплітудою. Зразки поміщалися під пригрузом і вище його. Таким чином, статичне навантаження, що діяло на зразки, передавалося через пружні вставки і металевий короб, минувши ЕДВ. Положення ЕДВ по вертикалі періодично регулювалося в процесі завантаження з тим, щоб його котушка завжди знаходилася в магнітному проміжку, а підвіски не були деформовані.

Описанная конструкция имеет расчетную схему, представляющую собой систему с одной степенью свободы с двумя одинаковыми упругими элементами и одной массой  $M$ .

Виміри  $E_0$  і  $n$  робилися циклами. Задавалося статичне навантаження з кроком 0,1 МПа в інтервалі до 1 МПа, з кроком 0,5 МПа в інтервалі 1...5 МПа і через 1 МПа в інтервалі 5... 10 МПа. Величина навантаження контролювалася за свідченнями манометра з урахуванням площі зразків. На кожному етапі статичного завантаження зразки витримувалися впродовж 10 хвилин, а потім знаходилися резонансна частота  $f$  і амплітуда віброприскорення віброплатформи  $\ddot{x}_1$  і пригруза  $\ddot{x}_2$ . На усіх етапах завантаження вимірювалася висота зразків  $h$ . Одночасно у вимірах брали участь шість зразків з розмірами перерізу 30 x 30 мм і заввишки до 25 мм в не обжатому стані. Кожен матеріал був представлений дванадцятьма зразками. При вимірах три зразки укладалися на пригрузе і три під ним. Виміри робилися двічі. Крім того, були виконані виміри на парах зразків

розмірами 90 мм x 90 мм в один шар (заввишки до 10 мм). Розміри зразків трохи впливали на результат вимірів.

Можна бачити, що відмінність описаної методики від стандартної полягає, в основному, в конструктивних особливостях стенду. Якщо у разі малих статичних навантажень резонансні частоти знаходилися в межах 20 - 150 Гц внаслідок невеликої жорсткості зразків, то при великих навантаженнях вимірювальна система здійснювала резонансні коливання на частотах 200 - 1300 Гц. У основу методики вимірів покладено припущення про частотну незалежність динамічного модуля пружності і коефіцієнта втрат зразків.

### **3.6 Результати виміру динамічних характеристик деяких звукоізоляційних матеріалів при статичних навантаженнях до 10 МПа**

Як і у разі статичних випробувань матеріалів, результати вимірів були оброблені з використанням апарату кореляційно-регресійного аналізу. Особливістю результатів динамічних вимірів стало те, що експериментальними залежностями  $E_d = f(\sigma)$  були, як правило, S - образні криві, які можна описати рівняннями полінома третьої і вищих мір.

Для полегшення обробки експериментальних даних S - образна крива розбивалася на дві ділянки, кожен з яких описувався рівнянням кривої другого порядку виду  $y = ax^2 + vx + z$ , тобто апроксимуюча залежність була представлена як кусочно-криволінійна. Перша ділянка характеризує залежність  $E_d$  від малих навантажень, другий - від великих. Погрішності в апроксимації, що позначаються при навантаженнях  $\sigma > 9$  МПа, цікавлять нас в меншій мірі. Виміряні значення коефіцієнтів втрат слабо залежали від навантаження, тому як характеристика  $n$  прийнята середня арифметична. Рівняння регресії для динамічного модуля пружності  $E_d$  і середнє значення коефіцієнта втрат  $n$  досліджених матеріалів приведені в таблицю. 3.4.

Графіки залежності динамічного модуля пружності  $E_d$  від малих і

великих навантажень представлені на рис. 3.5 і 3.6. З графіків рис. 3.6 можна бачити, що при статичному навантаженні на прокладення до 5 МПа (максимального навантаження в горизонтальних стиках великопанельних будівель) динамічний модуль пружності  $E_d$  для усіх досліджених матеріалів, окрім синтетичної сітки, не перевищує 1000 МПа. У стиках верхніх поверхів і в стиках конструкцій, що самонесущих, при навантаженні до 1,5 МПа модуль пружності прокладень  $E_d$  не перевищує 150 МПа. Зіставляючи отримані характеристики прокладень з модулем пружності основних конструкційних матеріалів, наприклад, бетону ( $E = 29 \cdot 10^3$  МПа) і сталі ( $E = 21 \cdot 10^4$  МПа), можна бачити, що матеріали прокладень при максимально можливих навантаженнях в стиках несних конструкцій будівель мають модуль пружності на декілька порядків нижче. Це дозволяє чекати значного ефекту віброізоляції в стиках з прокладеннями. Отримані експериментальні дані про динамічні властивості матеріалів прокладень дозволяють вибрати оптимальний матеріал і конструкцію прокладення.

Усі перераховані матеріали мають достатню деформативність і в процесі обтискання герметизують стик. При навантаженні від 1 до 5 МПа динамічний модуль пружності  $E_d$  досліджених матеріалів знаходиться в межах від 150 до 1000 МПа. Для великих навантажень характерне уповільнення росту  $E_d$ . Оптимальними з досліджених матеріалів слід визнати технічне синтетичне сукно, пресоване лавсанове волокно і просочену антисептиком деревноволокнисту ізоляційну плиту. Перераховані матеріали довговічні і мають достатній обсяг виробництва (ДВИП) або відходів паперової (синтетичне сукно) і хімічної (лавсан) промисловості. Матеріали з відходів не підлягають регенерації і мають низьку вартість.

Таблиця 3.4 - Рівняння кореляційної залежності динамічного модуля пружності  $E_d$  від напруги  $\sigma$  і середні значення коефіцієнтів втрат  $n$

Найменування матеріалу	Діапазон $\sigma$ , МПа	Рівняння регресії для $E_d$ , МПа	$n$
Транспортерна стрічка	0,3-10,0	$E_d = - 10,7 \sigma^2 + 177,5 \sigma - 27,1$	0,182
	0,01-0,3	$E_d = - 291 \sigma^2 + 152,3 \sigma + 2,93$	0,274
Пресовані лавсанові	0,1-10,0	$E_d = - 9,89 \sigma^2 + 190,0 \sigma + 14,1$	0,154
	0,004-0,1	$E_d = 2589 \sigma^{2+51,1} \sigma - 0,25$	0,265
ДВИП М- 4	0,1-10,0	$E_d = -12,68 \sigma^{2+264,1} \sigma + 17,7$	0,058
	0,01-0,1	$E_d = 4170 \sigma^{2-27,5} \sigma + 0,96$	0,295
Технічне х/б і сушарне сукно	0,15-10,0	$E_d = - 17,97 \sigma^2 + 282,3 \sigma - 23,3$	0,237
	0,01-0,1	$E_d = 151 \sigma^2 + 106,5 \sigma + 0,917$	0,336
Технічне синтетичне	0,1-10,0	$E_d = - 8,6 \sigma^2 + 176,1 \sigma - 5,6$	0,151
	0,01-0,2	$E_d = - 14,13 \sigma^2 + 128,5 \sigma + 1,3$	0,385
Синтетична сітка	0,1-10,0	$E_d = -22,12 \sigma^2 + 375,4 \sigma - 15,8$	0,220
	0,005-0,2	$E_d = 791 \sigma^2 + 124,3 \sigma + 0,63$	0,454

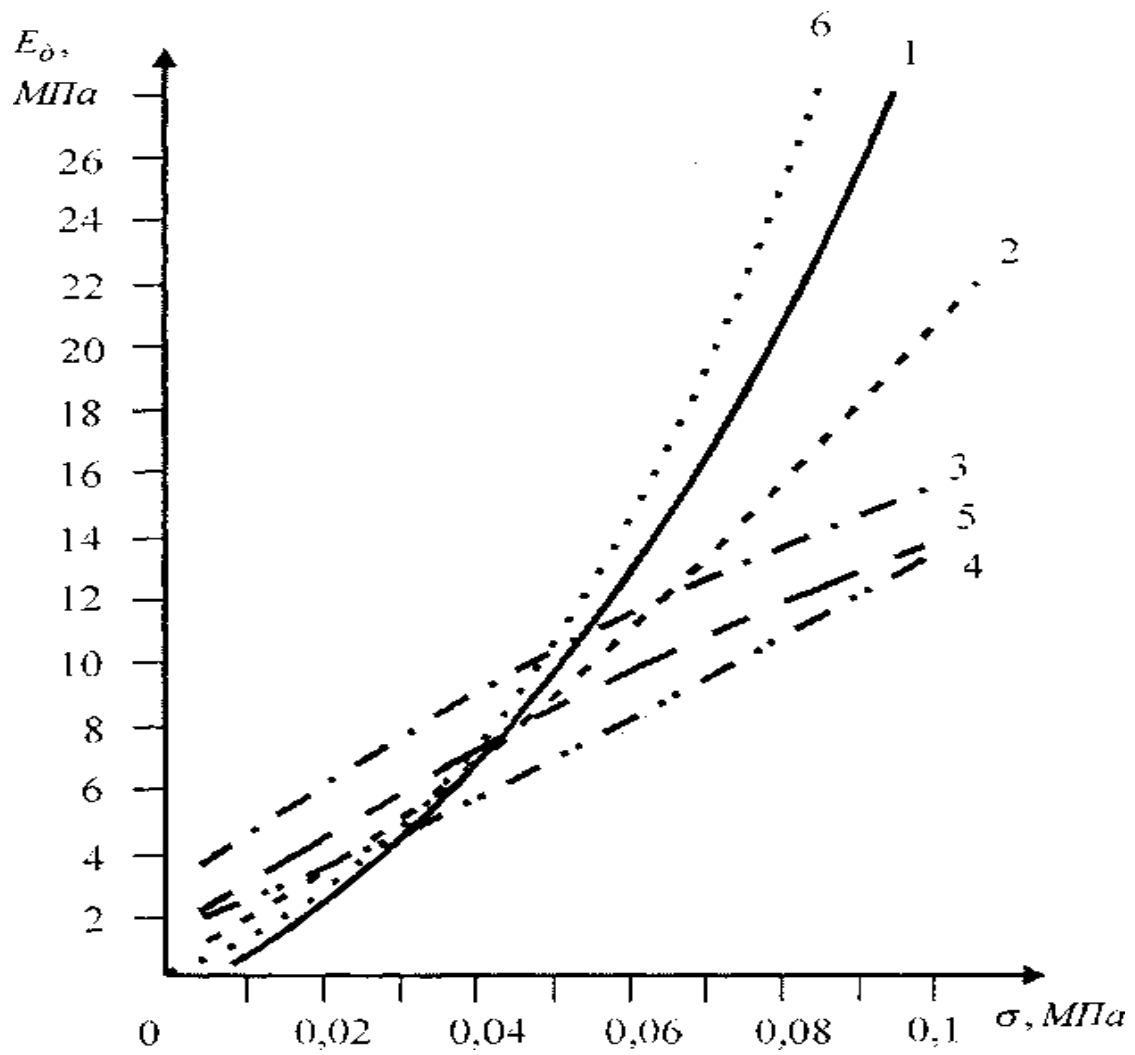


Рисунок 3.5 - Апроксимуючі залежності  $E_d$

- 1 - пресовані лавсанові волокна;
- 2 - синтетична сітка;
- 3 - транспортерна стрічка;
- 4 - технічне бавовняне сушарне сукно;
- 5 - те ж, синтетичне;
- 6 - деревноволокниста ізоляційна плита ДВІП М- 4.

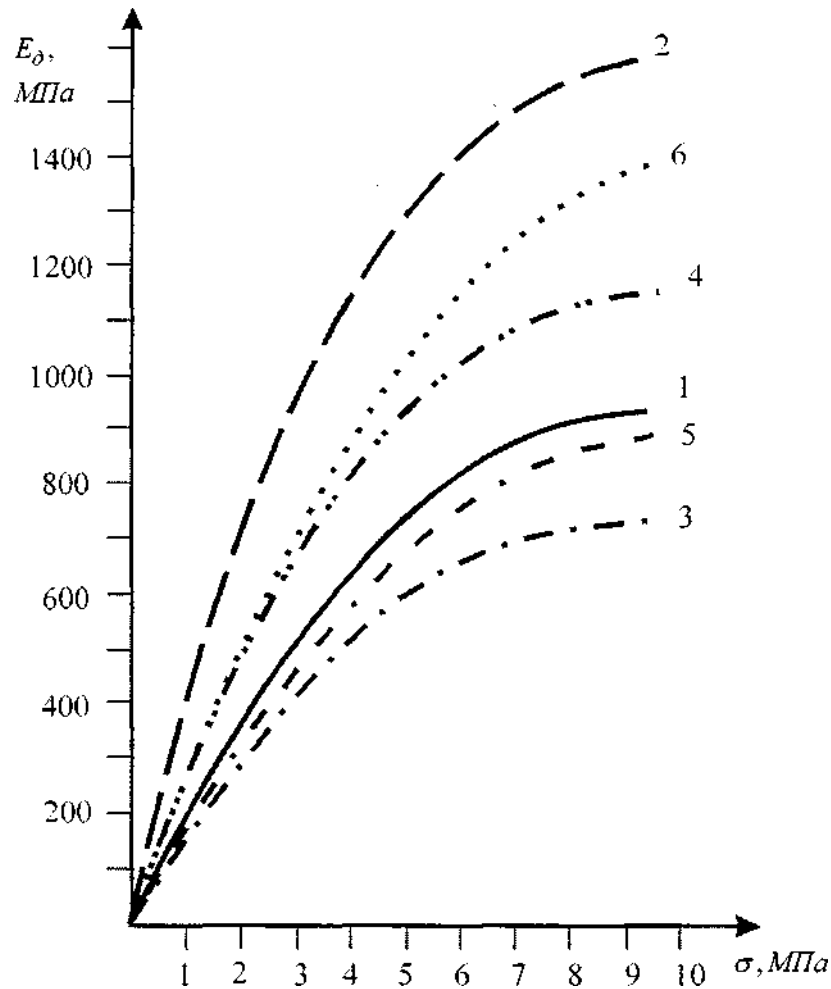


Рисунок 3.6 -Аппроксимирующие зависимости  $E_0$

ских навантаженнях:

1 - пресовані лавсанові волокна; 2 - синтетична сітка;

3 - транспортерна стрічка; 4 - технічне бавовняне сушарне сукно; 5 - те ж, синтетичне; 6 - деревноволокниста ізоляційна плита ДВИП М- 4

Товщина прокладень для горизонтальних стиків несних конструкцій в необжатовому стані повинна складати близько 20 мм. Може бути використана тришарова конструкція прокладення, що складається з двох шарів м'якших матеріалів і середнього шару з синтетичної сітки. Таке армоване прокладення має велику жорсткість до зрушуючих зусиль, діючих в стикі (вітрове навантаження, горизонтальна складова сейсмічного навантаження і так далі). Загальна товщина такого прокладення (наприклад, синтетичне сукно - синтетична сітка - синтетичне сукно) повинна складати 12... 15 мм в необжатовому стані.



### 3.7 Висновки по третьому розділу

1. Пружно-диссипативні властивості конструкційних і звукоізоляційних матеріалів характеризуються динамічним модулем пружності і коефіцієнтом втрат. Для конструкційних матеріалів ці характеристики слабо залежать від статичних навантажень, що прикладаються до матеріалу, і можуть бути представлені у вигляді констант матеріалів.
2. Дослідження статичного модуля пружності звукоізоляційних матеріалів показали, що з ростом навантаження ріст  $E_{ст}$  сповільнюється, а загасання абсолютних деформацій відбувається впродовж перших 5... 10 хвилин після додатка навантаження, що свідчить про стабілізацію пружних властивостей матеріалів прокладень вже в процесі монтажу конструкцій.
3. Пружно-диссипативні властивості звукоізоляційних матеріалів залежать від прикладеного статичного навантаження, що змінює структуру матеріалу. Залежність динамічного модуля пружності від статичного навантаження має вигляд S -образної кривої. При навантаженнях від 1 до 5 МПа, характерною для горизонтальних стиків 9-ти поверхових будівель,  $E_0$  волокнистих матеріалів знаходиться в межах 150... 1000 МПа. Коефіцієнт втрат  $n$  зменшується з ростом статичного навантаження на матеріал.

## РОЗДІЛ 4

### ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА

#### 4.1 Небезпечні та шкідливі виробничі фактори при роботі в ревербераційній камері

Розглянемо небезпечні та шкідливі виробничі фактори, які впливають на людину відповідно до класифікації, наведеної у ГОСТ 12.0.003-74. Робоче місце знаходиться у ревербераційній камері. Відповідно до цього на працівника діють такі небезпечні виробничі фактори:

##### 1. Фізичні:

- підвищене значення напруги в електричному ланцюзі, замикання якого може відбутися через тіло людини;
- підвищений рівень електромагнітних випромінювань;
- підвищений рівень шуму на робочому місці;
- підвищений рівень вібрації.

##### 2. Психофізіологічні:

- нервово-психічні перевантаження (перенапруга аналізаторів, монотонність праці, зоровий дискомфорт).

Підвищене значення напруги в електричному ланцюзі, замикання якого може відбутися крізь тіло людини. Джерелами є електронагрівальні пристрої, комп'ютер, спеціальні пристрої.

Підвищений рівень електромагнітних випромінювань. Джерелом є комп'ютер. Використовується для обробки та аналізу наукових даних. Хоча зараз сучасні комп'ютери випускають із захисними екранами або спеціально нанесеним на дисплей захисним шаром, це не вирішує проблеми впливу електромагнітного випромінювання на користувача комп'ютером.

Є випромінювання, яке йде із задніх стінок комп'ютера при його роботі, якщо ця частина комп'ютера не захищена. Також додатковими джерелами служать периферійні пристрої комп'ютера - принтери, сканери та

ін. Відмінною ж особливістю сучасних комп'ютерів є збільшення робочих частот центрального процесора і периферійних пристроїв, а також підвищення споживаної потужності до 400 - 500Вт. У результаті цього рівень випромінювання системного блоку на частотах 40 - 70 ГГц за останні 2 - 3 роки збільшився в тисячі разів і став набагато більш серйозною проблемою, ніж випромінювання монітора. Тривалість дії фактора – близько 20 год/тиждень (половина робочого часу).

Підвищений рівень шуму на робочому місці. Джерелами є тестове та експериментальне обладнання. При визначенні шумових характеристик обладнання піддають максимальному навантаженню для отримання більш істотних даних, у зв'язку з цим виникає потреба в захисті від негативної дії шуму на робочому місці.

Підвищений рівень вібрації на робочому місці. Джерелом є тестове та експериментальне обладнання, яке створює під час роботи велике динамічне навантаження і призводять до поширення вібрації в конструкції будівлі. Ця вібрація супроводжує та є причиною появи шуму. В спектральному складі вібрації переважають октавні смуги з середньо-геометричними частотами 31,5 і 63 Гц.

Нервово-психічні перевантаження (перенапруга аналізаторів, монотонність праці, зоровий дискомфорт). Джерело – робота на комп'ютері. Тривалість дії фактора – близько 20 год/ тиждень (половина робочого часу), що вкладається в норму (не більше 6 год/день).

#### **4.2 Технічні та організаційні заходи для зменшення рівня впливу небезпечних та шкідливих виробничих факторів при роботі в ревербераційній камері**

1. Небезпечне значення напруги в електричному ланцюзі, замикання якого може відбутися крізь тіло людини.

Забезпечення електроенергією електроприладів здійснюється від щита

з розподільними трансформаторами, під'єданого до електричного ввідного пристрою через захисний вимикальний пристрій. Усе електроустаткування при напрузі понад 42В, а також устаткування і механізми, які можуть бути під напругою, занулені. Усі розетки мають маркування, із значенням напруги, яка подається. Всі елементи електричних приладів, по яких проходить струм мають біти надійно захищені від випадкового дотику. При експлуатації електронагрівальних приладів необхідно слідкувати за тим, щоб вони були розміщені якнайдалі від легкозаймистих речовин, матеріалів, предметів і конструкцій. Металеві та неметалеві електропровідні конструкції, комунікації та виробниче обладнання повинні бути заземленими. В них допускається напруга 42 В. Інколи в науково-дослідницьких роботах необхідно застосовувати установки з напругою 220 В і більше. Такі установки спричиняють особливу небезпеку. Робота на установках з напругою більше 220В повинна виконуватись не менше, ніж двома особами, одна з яких повинна мати кваліфікацію, яка дає право на виконання самостійних робіт на таких установках. Останні обладнуються захисним огородженням, заземленням, блокуванням, сигналізацією, рубильником в колах живлення, плакатами та відповідно затвердженою інструкцією. Не можна залишати без нагляду не виключені електро- і радіоприлади, допускати до них сторонніх осіб.

В кабінетах, де є комп'ютерна техніка також існує потреба щодо вжиття необхідних заходів безпеки. Використання нової обчислювальної техніки потребує дотримання певних заходів безпеки при її експлуатації. В кабінеті повинна підтримуватись оптимальна температура 17-21°C, вологість 40-60 %. При роботі з обчислювальною технікою важливо враховувати оптимальні умови освітленості. В кабінеті забороняється доторкатися до електрообладнання, клем, електродротів, арматури і відкривати дверці електрошаф. Для персональних комп'ютерів дозволяється подавати напругу не більше 42 В. Приєднувати до електромережі комп'ютери з більш високою напругою живлення можна лише за допомогою шлангових дротів з

подвійною ізоляцією. Їх штепсельні розетки, крім гнізд для робочих контактів, повинні мати ще одне гніздо для заземлення контакту. Справність ПК слід випробувувати один раз в 3 місяці.

## 2. Підвищений рівень електромагнітних випромінювань.

Щоб уникнути несприятливого впливу електромагнітного випромінювання від комп'ютера на користувача необхідно:

- по можливості, варто придбати рідкокристалічний монітор, оскільки його випромінювання значно менша, ніж у поширених ЕЛТ моніторів (монітор з електронною трубкою);

- при покупці монітора необхідно звернути увагу на наявність сертифікату;

- системний блок і монітор повинен знаходитися якнайдалі від вас.

- не залишайте комп'ютер включеним на тривалий час якщо ви його не використовуєте, хоча це і прискорить знос комп'ютера, але здоров'я корисніше. Так само, не забудьте використовувати "сплячий режим" для монітора;

- у зв'язку з тим що електромагнітне випромінювання від стінок монітора набагато більше, постарайтеся поставити монітор в кут, так що б випромінювання поглиналося стінами. Особливу увагу варто звернути на розстановку моніторів в офісах;

- по можливості скоротіть час роботи за комп'ютером і частіше переривайте роботу;

- комп'ютер повинен бути заземлений.

## 3. Підвищений рівень шуму на робочому місці.

За будь-якої виробничої діяльності, а також організації робочих місць варто передбачати необхідні заходи, спрямовані на зниження шуму, що впливає на людину, до значень, які не перевищують допустимі. Це досягається технічними засобами боротьби із шумом (зменшенням шуму машин); застосуванням технологічних процесів, за яких рівні звукового тиску на робочих місцях не перевищують припустимі; використанням при

будівництві звуковбирних матеріалів; застосуванням засобів індивідуального захисту (протишумні шоломи, навушники, вкладиші у вуха); організаційними заходами (вибором раціонального режиму праці й відпочинку, скороченням часу перебування в гучних умовах). Санітарними правилами забороняється навіть короткочасне перебування людей в зонах з активними рівнями звукового тиску понад 135 дБ.

Розрахунок шумового режиму робочого місця.

Порядок розрахунку полягає у визначенні рівнів звуку на захищеній від шуму території або в приміщенні будівлі даного призначення і зіставленні їх з допустимими рівнями звуку. Розрахункові рівні звуку для транспортних потоків, на міських магістралях або дорогах приймаються в залежності від їх інтенсивності згідно рис.4.1.

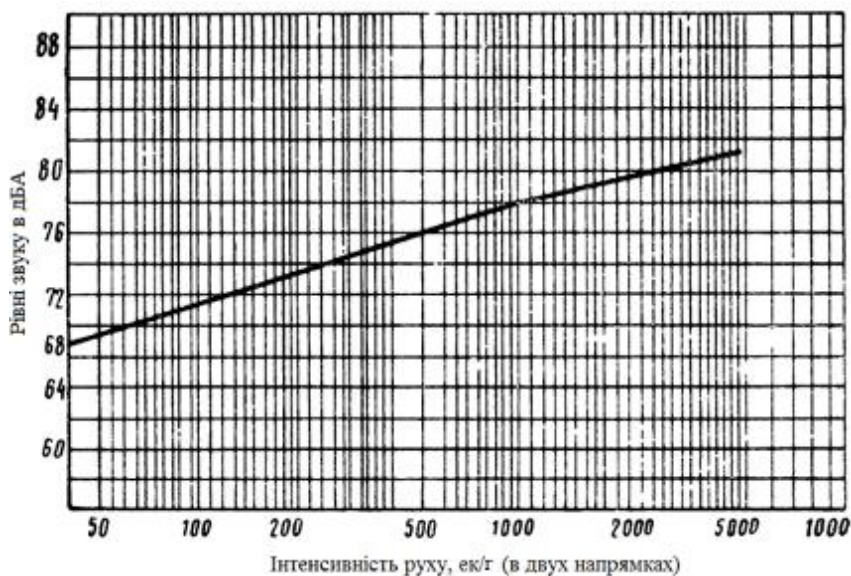


Рисунок 4.1 - Графік для визначення розрахункових рівнів звуку транспортних потоків в залежності від інтенсивності, швидкості і характеру транспортного потоку

Розрахунок очікуваної величини транспортного шуму:

$$L_{A7} = 46 + 11,8 \lg N + \sum D = 46 + 11,8 \lg 191 + 2 = 71,88 ,$$

де  $N$  – інтенсивність руху транспорту в обох напрямках в ек/год;  $\sum D$ -сума похибок.

Шумовий режим робочого місця складає 71,88 дБА.

Використання рис.4.1 і розрахунку можуть бути використані для визначення величини  $L_{A7}$  тільки на ділянках з безперервним рухом транспорту, коли задані умови транспорту не відрізняються від умов руху, прийнятих для умов побудови графіка, а саме:

А) при характері (складі) руху вантажного і громадського транспорту 10-90% і швидкості руху основного потоку 20-60 км / год;

Б) при розділювальних смугах по осі проїзної частини з шириною менше 5м;

В) при проїзної частини з покриттям з асфальтобетону або цементобетону;

Г) при відстані між лініями безперервної забудови більше 50-60 м.

#### 4. Підвищений рівень вібрації на робочому місці.

Основними заходами щодо боротьби з вібрацією є зниження вібрації: зниження вібрації в джерелі виникнення; зменшення вібрації на шляху поширення - віброізоляція, шляхом застосування пружинних і гумових прокладок, спеціальних підкладок під устаткування; застосування дистанційного управління, що виключає передачу вібрацій на робоче місце; використання індивідуальних засобів захисту (антивібраційні рукавиці, взуття, гумові килимки). Віброуюче устаткування періодично й після ремонту варто перевіряти на відповідність його діючим санітарним нормам. Для виміру вібрації застосовуються вібрографи, вимірники шуму та вібрації, а також інші прилади, показані на рис. 4.2.

5. Нервово-психічні перевантаження (перенапруга аналізаторів, монотонність праці, зоровий дискомфорт). Порушення зорових функцій у користувачів комп'ютерів пов'язані, в основному, з трьома групами факторів:

- параметрами освітлення робочого місця;
- характеристиками дисплея;
- специфікою роботи за комп'ютером.

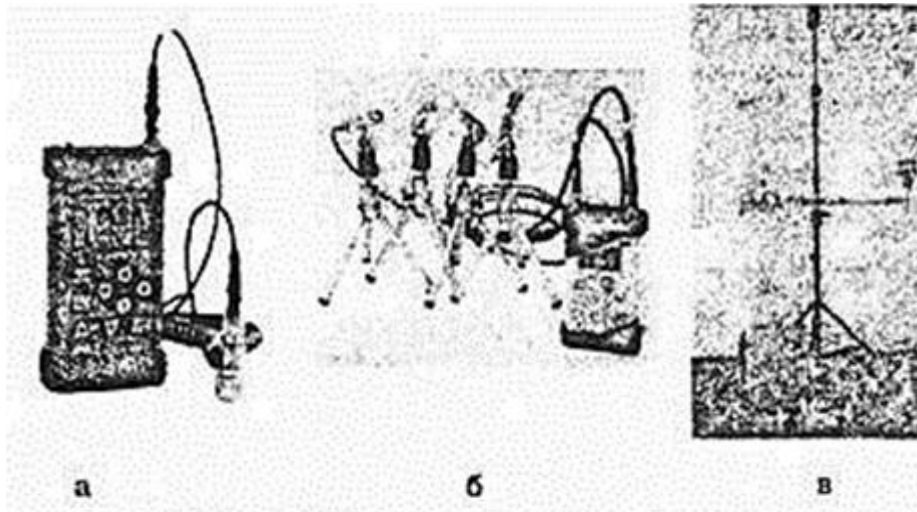


Рисунок 4.2 - Типи шумомірів та віброметрів: а) Алгоритм – 02 вібромір; б) SVAN – 948 чотирьохканальний; в) SV – 210/211 Стационарна шумомір і вітромір системи моніторингу шуму

Тому, необхідно звернути увагу на забезпечення раціонального освітлення на робочому місці, використання сучасних дисплеїв з покращеними характеристиками, дотримання режимів праці та відпочинку, а також необхідно щоб центр екрана дисплея був нижчий від кута зору людини.



## ВИСНОВОК

1. Проектування звукоізоляції в цивільних будівлях вимагає системного підходу, заснованого на раціональній функціональній організації будівлі, поліпшенні власних віброакустичних характеристик конструкцій, що захищають, і оптимізації усіх параметрів поширення звуку і вібрації на основі комплексного віброакустичного розрахунку будівлі або його фрагмента з урахуванням поширення звукової вібрації по конструктивному остову будівлі.

2. Акустичне проектування будівель слід розглядати як загальне завдання, що включає ряд приватних завдань обміну енергією звукових хвиль між конструкціями і приміщеннями. З усіх розглянутих в роботі теоретичних моделей поширення звуку і вібрації у будівлі найбільш обґрунтованою являється теорія статистичного енергетичного аналізу (СЕА), фізичні основи якої більшою мірою відповідають сучасному стану будівельної акустики. Математичне моделювання поширення звуку у будівлі на основі СЕА дозволяє розробити методологію виконання інженерних розрахунків звуко віброізоляції на основі детального опису планувальної і конструктивної системи будівлі, призначення проектних акустичних і вібраційних навантажень на окремі елементи (приміщення і конструкції) і обчислення рівнів шуму в суміжних і видалених приміщеннях, а також амплітуд віброприскорення на будівельних конструкціях.

3. Розвиток методології статистичного енергетичного аналізу спрямований на поліпшення точності і розширення сфери застосування методу. Вдосконалення фізичної моделі СЕА ґрунтується на сучасному стані хвилевої теорії. «Повна» модель СЕА враховує енергію не лише вигинистих, але і подовжніх і сдвигових хвиль в передачі структурного звуку по конструктивному остову будівлі. Кожен конструктивний елемент будівлі розглядається як сукупність підсистем, що мають енергію вигинистих, подовжніх і сдвигових хвиль. Обмін енергією між приміщеннями і

конструкціями відбувається в результаті взаємодії «акустичних» і «вигинистих» підсистем. Енергетичний обмін між конструкціями відбувається у вигляді 9 прямих і 9 зворотних потоків, включаючи потоки, пов'язані з перетворенням хвиль. В межах однієї конструкції також відбувається перерозподіл енергії від однієї підсистеми до іншої в результаті відображення хвиль від стиків з іншими конструкціями і перетворення хвиль з одного типу в інший.

У розрахунках власних хвилевих параметрів конструкцій, таких як фазові і групові швидкості поширення хвиль, власні частоти і щільність мод коливань в конструкціях запропоновано використати дисперсійні залежності, хвилеві параметри вигинистих і подовжніх коливань будівельних конструкцій, що дуже істотно коригують, вже на середніх і особливо на високих частотах.

4. Подальший розвиток цього методу дозволить на основі відомих і запропонованих теоретичних рішень, розрахункових методик і програмних модулів створити систему автоматизованого проектування (САПР) звукоізоляції в цивільних будівлях і зробити технологію віброакустичного розрахунку будівлі доступною проектувальникові. Розробка і впровадження в проектну практику комп'ютерної технології віброакустичного розрахунку житлових і громадських будівель створює можливість гарантованого забезпечення акустичного комфорту у будівлях, що будуються і реконструюються.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Авіаційна акустика. У 2-х ч. Ч. 2. Шум в салонах пасажирських літаків. Під ред. А.Г. Мунина. М.: Машинобудування, 1986. - 264 с.
2. Алексєєв Е.А. Непряма передача звуку у великопанельних будівлях: Дисс. ...канд. техн, наук: 05.23.10. - Горький, 1980.-212 с.
3. Анерт В., Рейхард В. Основи техніки звукопідсилення : Пер. з йому. - М.: Радіо і зв'язок, 1984. - 320 с.
4. Анциферов М.С. Деякі застосування віброметрії у будівельній акустиці // Звістки АН СРСР. Сер. Фізична. - 1949. - № 13. - С. 6-8.
5. Артильєре Э. та ін. Збірне будівництво в Європі і неєвропейських країнах // Збірне будівництво житлових, громадських і сільськогосподарських будівель : Із зарубіжного досвіду. - М.: Стройиздат, 1966. - С. 64-92.
6. Артоболовский И.И., Бобровницкий Ю.И., Генкин М.Д. Введення в акустичну динаміку машин. - М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. літри, 1979.- 296 с.
7. Арутюнян Н.Х., Абрамян Б.Л. Кручення пружних тел. - М.: Физматгиз., 1963.
8. Биргер А. та ін. Сухі прокладення в платформених вузлах великопанельних будівель // Будівництво і архітектура Москви. - 1967. - №5.
9. Блохіна И.П. Дослідження фізико-технічних параметрів звукоізолюючих матеріалів прокладень для конструкцій міжповерхових перекриттів : Дисс. ... канд. техн, наук: 05.23.03. -М., 1966.
10. Боголепов И.И. Промислова звукоізоляція. — Л.: Суднобудування, 1986.-368 с.
11. Боролицкий Л.С., Спиридонов В. М. Зниження структурного шуму в судових приміщеннях. - Л.: Суднобудування, 1974. - 221 с.
12. Бреховских Л.М. Распространенные волны вигину по пластинках // Журнал технічної фізики. - 1944. -т. XIV. -№ 9. - С. 568-576.

13. Будрин С. В., Никифоров А.С. Проходження хвиль через різні сполуки пластинів // Акустичний журнал. - 1963. - Т. IX, вып. 4. - С. 408-412.
14. Ващук Д.Б. Звуко- і віброізоляція міжповерхових і горищних перекриттів при використанні гумових амортизаторів під інженерне і технологічне устаткування: Дисс. ... канд. техн, наук: 05.23.10. - Челябінськ. - 1974. - 215 с.
15. Венецкий И.Г., Венецкая В. I. Основні математико-статистические поняття і формули в економічному аналізі: Довідник 2-е видавництво, перераб., і доп. - М.: Статистика, 1979. - 447 с.
16. Верховский В. I. Звукоізоляційні властивості матеріалів прокладень і рулонних, вживаних в конструкціях міжповерхових перекриттів : Дисс. ... канд. техн, наук: 05.23.10. -М. - 1973. - 199 с.
17. Герасимов А.И. Дослідження вибро- звукоізоляційних матеріалів і їх застосування в конструкціях міжповерхових перекриттів : Дисс. ... канд. техн, наук: 05.23.10. -М., 1968. - 198 с.
18. ГОСТ 16297-80. Матеріали звукоізоляційні і звукопоглинальні. Методи випробувань. - М.: Видавництво стандартів. - 1980. - 12 с.
19. Гутин Л.Я. Поширення структурного звуку // Обрані праці. - Л.: Суднобудування, 1977. - С. 422-457.
20. Дубнер А.Б., Тартаковский Д.Б. Енергетичний метод розрахунку поля вібрацій складних конструкцій. // Боротьба з шумом і вібрацією. - Волгоград, 1972. - С. 30 - 33.
21. Єгорова Э.Б., Григорьева Е.В. Дослідження прочностных і деформативных властивостей контактного стику на сухих прокладеннях // Дослідження і розрахунок сейсмостійких будівель і їх фундаментів на вічномерзлих ґрунтах: Сб. наукових праць ЛенЗНИИЭП. - Л. - 1982. - С. 9-17.
22. Єгорова Э.Б. Ефективність роботи стиків елементів великопанельних будівель, що несуть, при сухому монтажі // Герметизація і поліпшення експлуатаційних властивостей стиків будівель і споруджень /Ленингр.

- Будинок научно-технич. проп. - 1984. - С. 9-14.
23. Огорож В. І., Клячко Л.І., Росин Г. С. Боротьба з шумом методами звукоізоляції. М.: Стройиздат., 1964.- 123 с.
  24. Огорож В. І. Про непрямі шляхи поширення звуку у будівлях // Акустичний журнал. - 1967. - т. XIII. - Вып. 4. - с. 575-578.
  25. Огорож В. І. Теорія звукоізоляції конструкцій, що захищають. - М.: Стройиздат, 1969. - 185 с.
  26. Огорож В. І., Горенштейн И.В., Клячко Л.Н. та ін. Зниження шуму методами звукоізоляції. - М.: Стройиздат, - 1973. - 143 с.
  27. Огорож В. І., Лалаев Э.М., Микільський В. Н. Звукоізоляція в житлових і громадських будівлях. — М.: Стройиздат, 1979. — 254 с.
  28. Захаров А.В. Метод розрахунку проходження звуку через межі середовищ // Боротьба з шумами і вібраціями. - М.: Стройиздат, 1966.
  29. Захаров А.В. Практичний метод розрахунку проходження звуку через стики стержнів і пластинів // Доповіді VI Всесоюзної акустичної конференції. - М., 1968.
  30. Вимір і аналіз механічних коливань : Проспект фірми «Брюль і Кьєр». - 1982. - 40 с.
  31. Інструкція по забезпеченню нормативної звукоізоляції внутрішніх конструкцій великопанельних житлових будинків, що захищають, з уніфікованих виробів єдиного каталогу : ВСН 168-80 / ГлавМосстрой. - М., 1980.-33 с.
  32. Ісакович М.А. Загальна акустика. Навчальний посібник. М.: Наука. - 1973. - 495 с.
  33. Калюжный В. В. Поширення звукових вібрацій у багатоповерхових каркасних будівлях // Звістки внз. Будівництво і архітектура. - 1972. -№ 5.-С. 58-63.
  34. Калюжный В. В., Леденев В. І. Математичне моделювання поширення шумів у будівлях // Рішення інженерних завдань методами математичного моделювання. - Київ, 1978.-с. 100-107.

35. Калюжный В. В., Леденев В. И. Узагальнена математична модель поширення шумів у будівлях // Боротьба з шумом і звуковою вібрацією /Москв. Будинок научно-техн. проп. -М., 1979. - с. 51-57.
36. Канаев Б.А., Рибалка С. А., Тартаковский Б.Д. До оцінки поглинання енергії пов'язаних вигинистих і подовжніх коливань обмежених структур. // Акустичний журнал. - 1977. - Том 23. - № 1. - С. 69-73.
37. Каталог шумових характеристик технологічного устаткування (до СНиП II - 12-77 «Захист від шуму»). НИИСФ Держбуду СРСР. - М.: Стройиздат, 1988. - 152 с.
38. Клюкин И.И. До теорії звукоізолюючих прокладень // Журнал технічної фізики. - 1950. - Т. XX, Вып. 5. - С. 579-589.
39. Клюкин И.И. Експериментальне дослідження звукоізолюючих прокладень // Журнал технічної фізики. - 1950. - Т. XX, Вып. 5. - С. 590-601.
40. Клюкин И.И. Віброізоляція пружних прокладень і амортизаторів, що знаходяться під віброактивними механізмами : Огляд // Акустичний журнал. - 1979. - Т. XXV, Вып. 3. - С. 321-339.
41. Клюкин И.И., Колесніков А.Б. Акустичні виміри в суднобудуванні. 3 - є видавництво - Л.: Суднобудування, 1982. - 256 с.
42. Клюкин И.И. Про можливість застосування методів і критеріїв архітектурної акустики для оцінки вібраційних полів і віброізоляції в просторових механічних системах, системі // В сб.: «Боротьба з шумом і шкідливими вібраціями у будівництві». - Л., ЛДНТП. - 1984. - С. 59-62.
43. Кнудсен В. О. Архітектурна акустика: Пер. з англ. - Харків - Київ, 1936.- 525 с.
44. Ковригин С. Д. Про звукоізоляцію великопанельних будівель // Звістки внз. Будівництво і архітектура. - 1961. -№ 3.
45. Ковригин С. Д., Захаров А.В., Герасимов А.И. Боротьба з шумами в цивільних будівлях (ударні і структурні шуми). - М.: Стройиздат. - 1969.-328 с.

46. Кольський Г. Хвилі напруги в твердих тілах. - М.: ІЛ, 1955.
47. Костарев С. А. Дослідження по звукоізоляції акустично однорідними міжповерховими перекриттями з рулонною полою: Дисс. ... канд. техн, наук: 05.23.03. - 1977.
48. Кочнев А.П. Оцінка акустичної і коливальної енергій для усіх основних випадків розташування об'ємних конструкцій у будівлі: Рук., депонує у ВНИИИС. — 1982. — № 3436.
49. Кочнев А.П. Оцінка непрямой звукопередачі в складній конструктивній системі // В сб.: «Борьба з шумом і шкідливими вібраціями у будівництві». - Л., ЛДНТП. - 1984. - С. 63-66
50. Кочнев А.П. Методика оцінки і автоматизація проектування загальної структури будівлі з урахуванням комплексу одночасної дії зовнішніх і внутрішніх джерел шуму.// Проектування і інженерні дослідження. - 1984. -№ 1. - С. 16-18.
51. Abdelrazaq A.K., SE, MASCE and Korista D.S. Controlling subway noise in LG Art Centre - Sangham Hall // Proceedings of the 16th International Congress on Acoustics. - Seattle, Washington, USA. - 1998. - P. 1399-1400.
52. ASEI Software developed by InterAC, 1, Impasse des Hirondelles, 31240 L'union, France.
53. Asselianeau M. Train and rail transit noise in cinemas and theatres: case studies // Proceedings of the 16<sup>th</sup> International Congress on Acoustics. - Seattle, Washington, USA. - 1998. - P. 1401-1402.
54. Atalla N., Bernard R.J. Review of numerical solutions for low - frequency structural - acoustic problems // Applied Acoustics. - 1994. - V. 43. - P. 271-294.
55. AutoSEA Software developed by Vibro - Acoustic Sciences, Inc., 5355 Mira Sorrento PI# 100, San Diego CA 92121.
56. Beranek L.L. The transmission and radiation of acoustic waves by structures // Institution of Mechanical Engineers Proceedings. - 1959. -№ 173. - P. 12-35.

57. Beranek L.L. Noise and vibration control. - New York : McGraw - Hill, 1971. - 630 p.
58. Bharj T., Cimerman B. Application of statistical energy analysis (SEA) to a passenger vehicle: combining analytical and test - based prediction in a hybrid model. // Proceedings of the 25th Anniversary Congress on Sound and Vibration "Inter - Noise - 96". - Liverpool, England. - 1996. - P. 1303-1306.
59. Bharj T., Lee J.J., DeJong R.G., Keller T. Accuracy of statistical energy analysis (SEA) model to evaluate vehicle noise concerns. // Proceedings of the International Congress on Sound and Vibration "Inter - Noise - 99". - Liverpool, USA. - 1999.-P. 1689-1694.
60. Bhattacharya M.C., Crocker M.J. Forced vibration and radiation of sound into a room //Acustica. - 1970. - Vol. 22. - P. 275-294.
61. Bhattacharya M.C., Guy R.W., Crocker M.J. Coincidence effect with sound waves in a finite plate // J. of Sound & Vibration. - 1971. - V.18. - № 2. - P. 157-169.
62. Bhattacharya M.C., Mulholland K.A., Crocker M.J. Propagation of sound energy by vibration transmission via structural junctions // J. of Sound & Vibration. - 1971. - V.18. -№ 2. - P. 221-234.
63. Bies D.A., Hamid S. In situ determination of loss and coupling loss factors by the power injection method // Journal of Sound and Vibration. - 1980. - Vol. 70.-P. 187-204.
64. Bosmans I., Mees P., Vermeir G. Structure - borne sound transmission between thin orthotropic plates: Analytical solution. // Proceedings of the Meeting of CIB - WG51 - Acoustics. - Warsaw, Poland. - 1994.-P. 14-41.
65. Bosmans I., Mees P., Vermeir G. Vibrational energy flow at junctions of point connected plates. // Proceedings of the 25th Anniversary Congress on Sound and Vibration "Inter - Noise - 96". - Liverpool, England. - 1996. - P. 1471 - 1474.
66. Bosmans I., Vermeir G. Diffuse transmission of structure - borne sound at periodic joints of semi - infinite plates. *H* J. of the Acoustical Society of



- America. - 1997.-V. 101.-№6.- P. 3443-3456.
67. Bosmans I., Vermer G. The use of semi - analytical calculation model to verify SEA predictions // Rep. of Laboratory of Building Physics K.U. Leuven, NRS/IRS, Ottawa, Canada. - 1998. - 12 p.
  68. Bosmans I., Vermer G. The use of semi - analytical calculation model to verify SEA predictions on flanking transmission in building structures // Proceedings of the 16th International Congress on Acoustics. - Seattle, Washington, USA.- 1998.-P. 1391-1392.
  69. Caldersmith G., Rossing T.D. Determination of modal coupling in vibrating rectangular plates // Applied Acoustics. - 1984. - V.17. - P. 33-44.
  70. Capham A. Owner/builder perspective of the impact of trains on performance halls for Benaroya Hall, Seattle, Washington // Proceedings of the 16th International Congress on Acoustics. - Seattle, Washington, USA. - 1998. - P. 1393-1394.
  71. Carman T.A., Fothergill L.C. Rasmussen G. Application of the sound intensity technique to the measurement of sound transmission in buildings // Proceedings of the International Congress on Sound and Vibration "Inter - Noise - 90", - 1990.-P. 95-98.
  72. Cederfeldt L. On the use of the finite element method on some acoustical problems // Report D4 :1979. Lund Institute of Technology, Sweden. - 1979. - 94 P.
  73. Chaumette A., Girard N. Transmission du Son par les Structures // Cahiers du Centre Scientifique et Technique du Bâtiment. - 1975.-№ 171.-F. 1-16.
  74. Chemjowski M., Arcidiacono C. Simplified method for the evaluation of structure - borne vibration transmission through complex ship structures // The Shock and Vibration Bulletin. - 1972. - P. 235-243.
  75. Cocchi A., Semprini G., Secchi S. Evaluation of the flanking transmission in a scale model of two adjoining rooms // Proceedings of the 16th International Congress on Acoustics. - Seattle, Washington, USA. - 1998. - P. 351-352.
  76. Coffen Ch., Hardin L., Derwinski T. Statistical energy analysis of a high

- speed elevator cab and frame// Proceedings of Fifth International Congress on Sound and Vibration. - Adelaide, South Australia. - 1997. - Vol.4. - P. 2295-2304.
77. Conlon S.C., Hambric S.A. Statistical energy analysis prediction of injected power and response of panels with multiple attachments. // Proceedings of the International Congress on Sound and Vibration "Inter - Noise - 99". - Liverpool, USA. - 1999.-P. 1707- 1712.
  78. Connely T., Craik R.J.M., Steel J.A. Sound transmission through ship structures using statistical energy analysis // Proceedings of the 25th Anniversary Congress on Sound and Vibration "Inter - Noise - 96". - Liverpool, England. - 1996.-P. 2939-2942.
  79. Constable J.E.R. Transmission of Sound between neighboring Rooms in a brick Buildings // Proc. Phys. Soc. - 1935. - V. 51. - P. 53-61.
  80. Constable J.E.R. The transmission of Sound in a building by indirect paths // Proc. Phys. Soc. - 1938, - V. 50.-P. 368-373.
  81. Cops A., Vermeir G. Progress in building acoustics. // Noise /News international. - 1995. - March. - P. 10-25.
  82. Craik R.J.M. A study of sound transmission through buildings using statistical energy analysis. - Ph.D. thesis. - Heriot - Watt University, Edinburgh, Scotland. - 1980.
  83. Craik R.J.M. The noise reduction of acoustic paths between two rooms interconnected by a ventilation duct. // Applied Acoustics. - 1981. - Vol. 12. - №3.-P. 161-179.
  84. Craik R.J.M. Damping of building structures. // Applied Acoustics. — 1981. — Vol. 14.-P. 347-359.
  85. Craik R.J.M. The measurement of structure - borne sound transmission using impulsive sources. // Applied Acoustics. - 1982. - V.15. - P. 355-361.
  86. Craik R.J.M. The prediction of transmission through buildings using statistical energy analysis // J. of Sound and Vibration. - 1982. - Vol. 82. - № 4. - P. 505-516.

87. Craik R.J.M. The effect of random errors on a large statistical analysis model. // *Journal of Sound and Vibration*. - 1983. - V.91. -№ 1. - P. 57-64.
88. Craik R.J.M. The noise reduction of flanking paths. // *Applied Acoustics*. - 1987.-Vol. 22.- P. 163-175.
89. Craik R.J.M., Steel J. The effect of workmanship on sound transmission through buildings: Part I - Airborne sound. // *Applied Acoustics*. - 1989. - V.27.-P. 57-63.
90. Craik R.J.M., Steel J. The effect of workmanship on sound transmission through buildings: Part II - Structure - bome sound. // *Applied Acoustics*. - 1989.-V.27.-P. 137-145.
91. Craik R.J.M. Sound transmission paths through a statistical energy analysis model. // *Applied Acoustics*. - 1990. - V.30. - P. 45-55.
92. Craik R.J.M., Thancanamootoo A. Flanking transmission through buildings // *Proceedings of the International Congress on Sound and Vibration "InterNoise-90"*. - 1990.-P. 75-78.
93. Craik R.J.M., Steel J.A., Evans D.I. Statistical energy analysis of structure - bome sound transmission at low frequencies. // *Journal of Sound and Vibration*. - 1991.-V. 144. - № 1.-P. 95-107.
94. Craik R.J.M., Thancanamootoo A. The importance of in - plane waves in sound transmission through buildings. // *Applied Acoustics*. - 1992. - V.37. - P. 85-109.
95. Craik R.J.M. The influence of the laboratory on measurements of wall performance. // *Applied Acoustics*. - 1992. - V.35. - P. 25-46.
96. Craik R.J.M., Wilson R. Sound transmission through cavity walls // *Proceedings of the International Congress on Sound and Vibration "Inter — Noise — 93"*. — Leuven, Belgium. — 1993. — P. 451— 456.
97. Craik R.J.M A review of sound transmission through buildings using statistical energy analysis // *Proceedings of the International Congress on Sound and Vibration "Noise-93"*. - St. Petersburg, Russia. - 1993. - P. 215-220.

98. Craik R.J.M., Osipov A. Structural isolation of walls using elastic interlayers. // Proceedings of the Meeting of CIB - WG51 - Acoustics. - Warsaw, Poland. - 1994.-P. 42 -69.
99. Craik R.J.M., Osipov A.G. Structural isolation of walls using elastic interlayers. // Applied Acoustics. - 1995. - Vol. 46. - P. 233-249.
100. Craik R.J.M., Ming R., Wilson R. The measurement of structural intensity in buildings. // Applied Acoustics. - 1995. - Vol. 44. - P. 233-248.
101. Craik R.J.M., Smith R.S. Sound transmission through lightweight double walls using statistical energy analysis // Proceedings of the 25th Anniversary Congress on Sound and Vibration "Inter - Noise - 96". - Liverpool, England. - 1996.-P. 2933 - 2938.
102. Craik R.J.M., Wilson R. Sound transmission through parallel plates coupled along a line. // Applied Acoustics. - 1996. - V.49. -№ 4. - P. 353-372.
103. Craik R.J.M. Sound transmission through buildings using statistical energy analysis // Gower. - 1996. - 280 p.
104. Craik R.J.M., Nightingale T.R.T., Steel J.A. Sound transmission through a double leaf partition with edge flanking. // J. of the Acoustical Society of America. - 1997.-V. 101.-№ 2.-P. 964-969.
105. Craik R.J.M. Structure - borne sound transmission in lightweight buildings // Proceedings of the 16th International Congress on Acoustics. - Seattle, Washington, USA. - 1998. - P. 1387-1388.
106. Craik R.J.M. The contribution of long flanking paths to sound transmission in buildings. // Proceedings of the Meeting of CIB - WG51 - Acoustics. - Paris, France.- 1998. - P. 1 - 23.
107. Craven P.G., Gibbs B.M. Sound transmission and mode coupling at junction of thin plates. Part I. Representation of the problem // J. of Sound & Vibration. - 1981. - V. 77. - № 3. - P. 417-428.
108. Craven P.G., Gibbs B.M. Sound transmission and mode coupling at junction of thin plates. Part II. Parametric survey. // J. of Sound & Vibration. - 1981.- V.77.-№3.-P. 429-435.

109. Cremer L. Theorie der Schall dämmung dünner Wände bei Schrägen Einfall // Akustische Zeitschrift. - 1942. - № 7. - S. 81-104.
110. Cremer L. Calculation of sound propagation in structures // *Acustica*. - 1953. - V.3.- № 5.-S. 317-335.
111. Cremer L., Heckl M., Ungar E. Structure - borne sound. - Springer Verlag, 1973.-528 p.
112. Crocker M.J., Price A.J. Sound transmission using statistical energy analysis. // *Journal of Sound and Vibration*. — 1969. — Vol. 9. — № 3. — P. 469-486.
113. Crocker M.J., Price A.J., Sound transmission through double panels using SEA // *Journal of the Acoustical Society of America*. - 1970. - V.47. - № 3. - P. 688-693.
114. Cummings A., Mulholland K.A. The transmission loss of finite sized double panels in a random incidence sound field // *J. of Sound & Vibration*. - 1968. - V.8. - P. 126-136.
115. Cuschieri J.M. Structural power flow analysis using a mobility approach of an L - shaped plate// *J. of the Acoustical Society of America*. - 1990.- V. 87. - №3.-P. 1159-1165.
116. Cuschieri J.M., McCollum M.D. In - plane and out - of - plane waves' power transmission through an L - plate junction using the mobility power flow approach// *J. of the Acoustical Society of America*. - 1996.- № 1. - V. 100. - P. 857-870.
117. Dah - You Maa. Distribution of eigentones in a rectangular chamber at low frequency range // *J. of the Acoustical Society of America*. - 1939. - V. 10. - P. 235-238.
118. Davies H.G., Wahab M.A. Ensemble averages of power flow in randomly exited coupled beams // *Journal of Sound and Vibration*. - 1981. - Vol. 77. - №3.-P. 311-321.
119. Davies J.C., Gibbs B.M. Sound transmission at the corner of concrete plates // *Acustica*. - 1980. - V.45. - P. 39-45.
120. De Lange K., Moens I., Vandepitte D. The application of finite element

- models to study the energy flow properties of structural junctions // Proceedings of the 25th Anniversary Congress on Sound and Vibration "Inter - Noise - 96". - Liverpool, England. - 1996. - P. 2891- 2894.
121. De Langhe K., Sas P. Statistical analysis of the power injection method. // J. Acoustical Society of America. - 1996. - Vol.100. - № 1. - P. 294-303.
122. Donato R.J. Sound transmission through a double leaf wall // J. of the Acoustical Society of America. - 1972. - Vol.51. - P. 807.
123. Dym C.L., Lang M.A. Transmission of sound through sandwich panels // Journal of the Acoustical Society of America. - 1974. - Vol. 56. - № 5. - P.1523-1532.
124. Eichler E. Thermal circuit approach to vibrations in coupled systems and the noise reduction of a rectangular box // J. of the Acoustical Society of America. - 1965, - Vol.37. - №6 - P. 995-1007.
125. Eisenberg A. Messung der Körperschalldämmung von Isolierstoffen unter Belastung // Acustica. (Akustische Beihefte) - 1956. - Heft 1. - S. 186-188.
126. Elmallawany A. Criticism of statistical energy analysis for the calculation of sound insulation - Part I : Single partitions. // Applied Acoustics. - 1978. - Vol. II.-P. 305-312.
127. Elmallawany A. Criticism of statistical energy analysis for the calculation of sound insulation - Part II : Double partitions. // Applied Acoustics. - 1978. - Vol.13.-P. 33-41.

## Рецензія

здобувача рівня вищої освіти «другий (магістерський)» Ель Хадж Хаммад Уссама  
(п.і.б.)

Кваліфікаційна робота на тему: «Аналіз процесу поширення звуку в цивільних будівлях».

Кваліфікаційна робота магістра виконана згідно до завдання відповідає темі,  
(не) згідно не (відповідає)

містить мультимедійну репрезентацію листів графічного матеріалу і пояснювальну записку з 116 сторінок.

1. Актуальність теми (повнота постановки проблеми, формування проблеми та її значимість, постановка завдань досліджень) Тема магістерської роботи є актуальною тому що розвиток методології віброакустичного розрахунку цивільних будівель є актуальним напрямом наукових досліджень у будівельній акустиці, оскільки дозволяє вирішити ключові завдання теорії поширення звуку і вібрації і створює основи системи автоматизованого проектування звукоізоляції в цивільних будівлях, побудованої на сучасних теоретичних знаннях і комп'ютерних технологіях.

2. Ступінь науковості роботи (широта вивчення результатів досліджень за проблемою, методика дослідження, наявність елементів наукової новизни та ступінь їх розробки)\_

У кваліфікаційній роботі наведені сучасні метод розвитку теорії і методології розрахунку ізоляції шуму і вібрації в цивільних будівлях на основі повної моделі поширення енергії хвиль по будівельних конструкціях і через їх стики, аналіз теоретичних основ автоматизованої системи проектування звукоізоляції.

Наукова цінність роботи одержаних результатів полягає в наступному: аналіз алгоритмів і програм розрахунку коефіцієнтів проходження хвиль через стики будівельних конструкцій. Проаналізована повніша модель поширення звуку і вібрації у будівлі, яка, в розвиток методу статистичного енергетичного аналізу, розглядає конструктивні елементи будівлі як сукупність підсистем, що мають енергію вигинистих, подовжніх і сдвигових хвиль.

3. Якість подачі матеріалу роботи (ступінь взаємозв'язку розділів роботи, застосування комп'ютерних технологій, чіткість і технічна грамотність оформлення роботи, науковий стиль викладення матеріалу)

Магістерська робота виконана за допомогою сучасних комп'ютерних технологій. Усі розділи магістерської роботи оформлені згідно норм та відповідають вимогам, що

висуваються до магістерських робіт. Розділи взаємозв'язані один з одним, чітко та технічно грамотно оформлені. Науковий стиль викладення матеріалу – виконано у повному обсязі та відповідає вимогам, що висуваються до магістерської роботи.

4. Практична значимість результатів роботи (рівень реальності результатів та пропозицій, техніко - економічні показники запропонованих рішень, наявність публікацій за темою роботи) \_\_\_\_\_

Практичне значення одержаних результатів полягає в отриманні дані про динамічні властивості деяких звукоізоляційних матеріалів при дії статичних навантажень до 10 МПа, які можуть бути використані для розрахунку віброізоляції різних конструктивних вузлів.

5. Недоліки кваліфікаційної роботи магістра: в роботі потрібно більш детально розглянути процес проходження звукових хвиль через стики стрижневих конструкцій з пружними прокладками. Приведене зауваження не впливає на якість виконання роботи.

6. Кваліфікаційна робота магістра у цілому виконана (ний) на відповідальному рівні і заслуговує оцінки:

кількість балів 90

за національною шкалою 89%

за шкалою ЄКТС A

Рецензент доцент кафедри міського будівництва і господарства

Запорізького національного університету

(посада, місце роботи)

  
(підпис)

Фостащенко О.М.  
(П.І.Б.)



## ВІДГУК

керівника кваліфікаційної роботи

здобувача рівня вищої освіти «другий (магістерський)» Ель Хадж Хаммад Уссама  
(П.І.Б.)

Кваліфікаційна робота на тему: «Аналіз процесу поширення звуку в цивільних будівлях».

Викона згідно до завдання, відповідає темі, містить мульт. презентація листів  
(не) згідно (не) відповідає  
графічного матеріалу і пояснювальну записку з 116 сторінок, підписана консультантами  
і має рецензію.

1. Актуальність теми, наявність замовлення роботи підприємством (організацією)    

Слід визначити, що тема магістерської роботи є актуальною тому що аналіз методики експертизи теплозахисту будівель, що підлягають ремонту, з використанням приладів вітчизняного виробництва для контролю теплотехнічних параметрів, яка дозволяла б оперативного набувати фактичних значень показників теплозахисту із заданою надійністю і мінімальною погрішністю.

2. Глибина обґрунтувань прийнятих рішень (повнота розрахунків, наявність багато-варіантності)    

У кваліфікаційній роботі наведенед розвиток методології віброакустичного розрахунку цивільних будівель є актуальним напрямом наукових досліджень у будівельній акустиці, оскільки дозволяє вирішити ключові завдання теорії поширення звуку і вібрації і створює основи системи автоматизованого проектування звукоізоляції в цивільних будівлях, побудованої на сучасних теоретичних знаннях і комп'ютерних технологіях.

3. Загальний рівень підготовки та ерудиції здобувача ступеня вищої освіти «магістр»  
    відповідає прийнятим вимогам

4. Творчий потенціал і ступінь самостійності студента у вирішенні поставлених задач  
    на достатньому професійному рівні

5. Науковий рівень (для робіт дослідницького характеру) та глибина експериментальних досліджень     виконано у повному обсязі та відповідає вимогам

6. Застосування сучасних системних та інформаційних технологій, фізичного або математичного моделювання, наявність обґрунтування вибору типу ЕОМ, застосування

стандартних та оригінальних програм, наявність аналізу результатів та їх використання у роботі кваліфікаційна робота магістра виконана за допомогою сучасних комп'ютерних технологій та сучасних нормативних документів

7. Відповідність оформлення до вимог діючих стандартів оформлено згідно норм та стандартів

8. Дотримання студентом графіка виконання роботи дотримано

9. Наукова цінність роботи, практична значимість \_\_\_\_\_

Наукова цінність роботи одержаних результатів полягає в наступному: аналіз алгоритмів і програм розрахунку коефіцієнтів проходження хвиль через стики будівельних конструкцій. Проаналізована повніша модель поширення звуку і вібрації у будівлі, яка, в розвиток методу статистичного енергетичного аналізу, розглядає конструктивні елементи будівлі як сукупність підсистем, що мають енергію вигинистих, подовжніх і сдвигових хвиль.

Практичне значення одержаних результатів полягає в отриманні дані про динамічні властивості деяких звукоізоляційних матеріалів при дії статичних навантажень до 10 МПа, які можуть бути використані для розрахунку віброізоляції різних конструктивних вузлів.

10. У кваліфікаційній роботі магістра можна відмітити такі недоліки: \_\_\_\_\_

Як побажання слід висловити наступне: бажано було б більш детально розглянути процес проходження звукових хвиль через стики стрижневих конструкцій з пружними прокладками, але приведені зауваження не впливає на якість виконання роботи.

Кваліфікаційна робота магістра у цілому виконана на відповідальному рівні

і при відповідному захисті заслуговує на оцінку:

кількість балів 85 національною БДІА ЄКТС 4

Керівник професор  
(посада, науковий ступінь)

[Підпис]  
(підпис)

Ткаченко В.Б.  
(ПІБ)