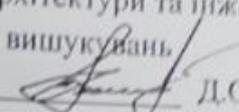


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет будівництва та транспорту
Кафедра Архітектури та інженерних вишукувань

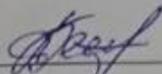
До захисту
Допускається
Завідувач кафедри
Архітектури та інженерних
вишукувань
 Д.С. Бородай
підпис
«10» грудня 2025 р

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

за другим рівнем вищої освіти

На тему: «Звукоізоляційні процеси у житловому секторі»

Виконав (ла)


(підпис)

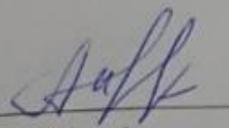
Бурдюг Р.Г.

(Прізвище, ініціали)

Група

ЗПЦБ 2401м

(Науковий) керівник


(підпис)

Андрух С.Л.

(Прізвище, ініціали)

Суми – 2026 р.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кафедра:

Архітектури та інженерних вишукувань

Спеціальність:

192 "Будівництво та цивільна інженерія"

ЗАВДАННЯ

НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Бурдюг Роман Григорович

1. Тема роботи Звукоізоляційні процеси у житловому секторі

Затверджено наказом по університету № 40/освід " 7 " січня 2025р.

2. Строк здачі студентом закінченої роботи: " 10 " грудня 2025р

3. Вихідні дані до роботи: Загальна характеристика об'єкта дослідження; Архітектурно-планувальні параметри; Конструктивні рішення огорожувальних конструкцій; Акустичні параметри та розрахункові умови, Нормативна та методична база
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що підлягають розробці)

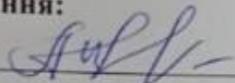
Вступ; Анотація; Розділ 1. Загальна характеристика роботи; Розділ 2. Бібліографічний огляд досліджень. Розділ 3. Дослідження ефективності звукоізоляційних рішень у житловому секторі; Розділ 4. Висновки та практичні рекомендації. Загальні висновки, Список літератури; Додатки.

5. Перелік графічного матеріалу (з точною вказівкою обов'язкових креслень)

Вашингтон, актуальність теми, об'єкт дослідження, предмет дослідження, мета дослідження, наукова та технічна новизна одержаних результатів, практичне значення, цюго одержаних результатів. Фрагментів доповіді на мультимедійному проекторі.

Завдання видав до виконання:

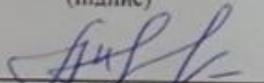
Керівник :


(підпис)

Андрух С.Л.

(Прізвище, ініціали)

Консультант:

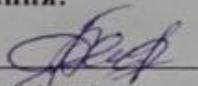

(підпис)

Андрух С.Л.

(Прізвище, ініціали)

Завдання прийняв до виконання:

Здобувач


(підпис)

Бурдюг Р.Г.

(Прізвище, ініціали)

ЗМІСТ

Завдання	
Анотація	
Вступ	
РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ.....	
РОЗДІЛ 2. БІБЛІОГРАФІЧНИЙ ОГЛЯД ДОСЛІДЖЕНЬ	
2.1. Історія становлення наукових підходів до звукоізоляції в будівництві.....	
2.2. Аналіз сучасних вітчизняних і зарубіжних досліджень.....	
2.3.1. Класифікація матеріалів за принципом дії	
2.3.2. Пористі звукопоглинальні матеріали	
2.3.3. Масивні матеріали та комбіновані системи	
2.3.4. Мембранні та композитні системи	
РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗВУКОІЗОЛЯЦІЙНИХ РІШЕНЬ У ЖИТЛОВОМУ СЕКТОРУ	
3.1. Вихідні дані для моделювання та характеристика досліджуваних конструкцій.....	
3.2. Методика оцінки звукоізоляційних властивостей	
3.2.1. Теоретичний підхід до визначення індексу ізоляції повітряного шуму	
3.2.2. Масово-пружні системи (комбінована звукоізоляція)	
3.2.3. Числове моделювання в LIRA-SAPR	
3.3. Теоретичний аналіз звукоізоляційних характеристик досліджуваних конструкцій	
3.3.1. Базові принципи акустичної оцінки	
3.3.2. Аналіз цегляної стіни товщиною 380 мм	
3.3.3. Аналіз монолітної бетонної стіни товщиною 200 мм	
3.3.4. Аналіз комбінованої масово-пружної системи	
3.4. Моделювання звукоізоляційних конструкцій у середовищі LIRA - SAPR	
3.4.1. Мета моделювання	
3.4.2. Вихідні геометричні та фізичні параметри конструкцій	
3.4.3. Граничні умови та метод обчислень	
3.4.4. Результати модального аналізу	
3.4.5. Аналіз амплітуд коливань	
3.4.6. Комбінована система звукоізоляції	
3.5. Впровадження комбінованої системи звукоізоляції в конструкціях житлових будівель	
3.5.1. Загальні підходи до реалізації системи	
3.5.2. Конструктивне виконання системи	
3.5.3. Порівняння ефективності та вартості	
3.6. Орієнтовна оцінка власних частот коливань цегляної стіни	
3.6.1. Оцінка власних частот коливань бетонної стіни	
3.6.2. Гармонічний аналіз коливань бетонної стіни для трьох характерних частот	
3.6.3. Інтерпретація для задачі звукоізоляції	
Висновки до розділу 3	

РОЗДІЛ 4. ВИСНОВКИ ТА ПРАКТИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ	
4.1. Наукові результати та їх значущість.....	
4.2. Практичні рекомендації	
4.2.1. Для забудовників та підрядних організацій	
4.2.2. Для власників житла	
4.2.3 Технологічні карти.	
4.3. Економічна доцільність і життєвий цикл	
4.4. Обмеження дослідження і межі застосовності	
4.5. Дорожня карта впровадження (новобудова будівництво)	
4.6. Прикладні можливих застосувань у конструкціях	
4.7. Науково-гуманізований аспект застосування	
Висновки до розділу 4	
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	
Список використаних джерел	
Додаток	

Анотація

Бурдюг Роман Григорович. Звукоізоляційні процеси у житловому секторі –
Кваліфікаційна робота магістра на правах рукопису.

Кваліфікаційна робота магістра за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія». – Сумський національний аграрний університет, Суми, 2025.

Робота складається із змісту, загальної характеристики роботи та її кваліфікаційних ознак, огляд досліджень за обраною темою, розділів основної частини та висновків по роботі.

Сформульовано мету, задачі, об'єкт та предмет дослідження, методи наукового дослідження.

Результати досліджень Магістерська робота присвячена дослідженню звукоізоляційних процесів у житловому секторі з урахуванням впливу конструктивних рішень огорожувальних елементів будівель. В роботі виконано аналіз сучасних теоретичних підходів та нормативних вимог до акустичного комфорту, проведено порівняння звукоізоляційної ефективності масивних та комбінованих стінових систем. Особливу увагу приділено формуванню масово-пружних структур зі звукопоглинальним прошарком на основі мінеральної вати та облицюванням типу 2×ГКЛ+MLV.

У рамках дослідження розроблено цифрову розрахункову модель у середовищі LIRA-SAPR 2024, яка відтворює реальну роботу однорідних та багатошарових конструкцій при дії гармонічного навантаження у вигляді звукового тиску. Виконано модальний та гармонічний аналіз, встановлені частотні області резонансної чутливості та визначено амплітуду прогину стін на частотах 100-500 Гц. Порівняльне моделювання показало, що комбінована система з демпфувальним прошарком забезпечує зниження амплітуди коливань у 2-3 рази відносно цегляної та бетонної стіни, що свідчить про підвищення індексу ізоляції повітряного шуму та підвищення акустичного комфорту в приміщенні.

Отримані результати можуть бути використані при проектуванні житлових будівель, реконструкції та модернізації існуючих споруд, а також при виборі

ефективних конструктивних рішень із підвищеними звукоізоляційними властивостями. Робота має практичне значення та може бути застосована у будівельному проєктуванні та експертизі акустичних систем огорожувальних конструкцій.

Ключові слова: звукопоглинання; звукоізоляція; житлові будівлі; масово-пружна система; мінеральна вата; гіпсокартон; MLV-мембрана; гармонічний аналіз; модальний аналіз; LIRA-SAPR 2024; акустичні коливання; огорожувальні конструкції; комфорт приміщення; індекс ізоляції.

Список публікацій:

1) Бурдюг Р.Г., Андрух С.Л. Аналіз ефективності звукоізоляційних матеріалів у сучасному житловому будівництві //Матеріали щорічної науково-практичної конференції викладачів, аспірантів та студентів Сумського національного аграрного університету (17-21 листопада 2025р). – Суми, 2025.

2) Бурдюг Р.Г., Андрух С.Л. Оптимізація звукоізоляційних процесів у житлових будівлях на стадії проєктування (продовження) //Матеріали щорічної науково-практичної конференції викладачів, аспірантів та студентів Сумського національного аграрного університету (17-21 листопада 2025р). – Суми, 2025.

В додатках наведено; тези конференції, альбом слайдів мультимедійної презентації.

Структура роботи.

Робота складається з основного тексту на __ сторінках, у тому числі __ таблиць, __ рисунків. Текст роботи містить загальну характеристику роботи, __ розділів, висновки і рекомендації за результатами роботи, список з __ використаних джерел, _ додатків на __ сторінках. Графічна частина складається з __ аркушів креслень та __ плакатів (або __ слайдів мультимедійної презентації).

Abstract

Burdyug Roman Grigorovich. Soundproofing processes in the residential sector

– Master's qualification work in the form of a manuscript.

Master's qualification work in specialty 192 "Construction and Civil Engineering". –

Sumy National Agrarian University, Sumy, 2025.

The **work consists** of the content, general characteristics of the work and its qualification features, a review of research on the selected topic, sections of the main part and conclusions on the work.

The goal, objectives, object and subject of the study, methods of scientific research are formulated.

Research results the master's thesis is devoted to the study of soundproofing processes in the residential sector, taking into account the influence of constructive solutions of building envelope elements. The work analyzes modern theoretical approaches and regulatory requirements for acoustic comfort, compares the soundproofing efficiency of solid and combined wall systems. Particular attention is paid to the formation of mass-elastic structures with a sound-absorbing layer based on mineral wool and facing of the type $2 \times \text{GKL} + \text{MLV}$.

As part of the study, a digital calculation model was developed in the LIRA-SAPR environment, which reproduces the real operation of homogeneous and multilayer structures under the action of harmonic loading in the form of sound pressure. Modal and harmonic analysis was performed, frequency regions of resonant sensitivity were established, and the amplitude of wall deflection at frequencies of 100-500 Hz was determined. Comparative modeling showed that the combined system with a damping layer provides a 2-3-fold reduction in the amplitude of vibrations relative to a brick and concrete wall, which indicates an increase in the airborne noise insulation index and increased acoustic comfort in the room.

The results obtained can be used in the design of residential buildings, reconstruction and modernization of existing structures, as well as in the selection of effective structural solutions with increased sound insulation properties. The work has practical

significance and can be applied in construction design and examination of acoustic systems of enclosing structures.

Keywords: sound absorption; sound insulation; residential buildings; mass-elastic system; mineral wool; drywall; MLV membrane; harmonic analysis; modal analysis; LIRA-SAPR; acoustic vibrations; enclosing structures; room comfort; insulation index.

List of publications:

1) **Burdyug R.G.**, Andrukh S.L. Analysis of the effectiveness of soundproofing materials in modern residential construction //Materials of the annual scientific and practical conference of teachers, postgraduate students and students of Sumy National Agrarian University (November 17-21, 2025). - Sumy, 2025.

2) **Burdyug R.G.**, Andrukh S.L. Optimization of soundproofing processes in residential buildings at the design stage (continued) //Materials of the annual scientific and practical conference of teachers, postgraduate students and students of Sumy National Agrarian University (November 17-21, 2025). - Sumy, 2025.

The appendices include; conference abstracts, multimedia presentation slide album.

Structure of the work.

The work consists of the main text on ___ pages, including ___ tables, ___ figures. The text of the work contains a general description of the work, ___ sections, conclusions and recommendations based on the results of the work, a list of ___ sources used, _ appendices on ___ pages. The graphic part consists of ___ sheets of drawings and ___ posters (or ___ slides of a multimedia presentation).

ВСТУП

Сучасний етап розвитку житлового будівництва характеризується підвищенням вимог до комфортності внутрішнього середовища, зокрема до рівня акустичного комфорту. Збільшення щільності міської забудови, інтенсивність транспортних потоків, поширеність технічного обладнання в межах житлових будівель, а також зміна соціальних моделей повсякденного життя (віддалена робота, домашні студії, малі офіси у квартирах) спричиняють необхідність якісної звукоізоляції як обов'язкового компонента безпечного та комфортного проживання.

Згідно з вимогами ДБН В.1.1-31:2013 «Захист від шуму», рівень шуму у житлових приміщеннях не повинен перевищувати встановлені нормативи, оскільки тривала дія звуку понад 55 дБ може викликати порушення сну, зниження працездатності, когнітивної уваги, підвищення тривожності та інші негативні наслідки для здоров'я людини. Таким чином, акустичний комфорт виступає важливою складовою якості житлового середовища та одним із критеріїв сталого та здорового міського простору.

На практиці ж реальний стан звукоізоляції у житлових будинках, побудованих у різні періоди, суттєво відрізняється. Найбільш поширеними проблемами є: передавання повітряного та ударного шуму через огорожувальні конструкції, формування акустичних «містків» у місцях жорстких стиків перекриттів і перегородок, відсутність поділу масивних та легких конструкцій, а також недосконалість монтажних технологій. Значна частина наявного житлового фонду України (панельні серії 1960–1990-х рр.) не відповідає сучасним вимогам щодо ізоляції звуку, що потребує модернізації та впровадження нових конструктивних рішень.

У контексті таких викликів зростає актуальність дослідження матеріалів і технологій звукоізоляції, особливо легких та комбінованих систем, які дозволяють не лише підвищити ефективність захисту від шуму, а й зменшити масу та товщину конструкцій, оптимізувати витрати, скоротити терміни будівництва й знизити навантаження на несучі елементи. Сучасні підходи до звукоізоляції охоплюють не лише традиційні масивні матеріали (бетон, цеглу),

але й пористі звукопоглинальні матеріали, мембранні та композитні системи, біополімерні та вторинні акустичні матеріали, що відповідають вимогам циркулярної економіки та принципам «зеленого будівництва».

Особливого значення набувають багатошарові масово-пружні системи, де поєднання жорсткого шару, еластичного прошарку та поглинальної структури забезпечує одночасне гасіння коливань, розсіювання і часткове відбиття звукової хвилі. Такі системи дають змогу досягти індексу ізоляції R_w на 10–15 дБ вищого, ніж у традиційних монолітних стін тієї ж товщини, що є надзвичайно важливим у реконструкції та легкому будівництві.

У науковій сфері проблема звукоізоляції розглядається з позицій фізики акустичних хвиль, матеріалознавства, архітектурно-конструктивного моделювання, а також ергономіки та психології житлового простору. Водночас практичний аспект питання пов'язаний із вибором раціональних матеріалів, конструкторських рішень, систем монтажу та контролю якості виконання.

Таким чином, тема даної магістерської роботи є актуальною, оскільки відповідає сучасним тенденціям розвитку будівельної галузі, а також спрямована на покращення якості життя населення шляхом оптимізації акустичних характеристик житлових приміщень.

Метою роботи є аналіз звукоізоляційних процесів у житловому секторі, порівняння традиційних і сучасних матеріалів, виявлення ефективних конструктивних схем і формування рекомендацій щодо застосування комбінованих систем у практиці будівництва та реконструкції.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі завдання:

- провести бібліографічний огляд вітчизняних і зарубіжних досліджень щодо звукоізоляції в житловому будівництві;
- класифікувати основні групи матеріалів за принципом акустичної дії;
- визначити ефективність пористих, масивних, мембранних та композитних систем;
- сформувати порівняльну таблицю акустичних та експлуатаційних характеристик матеріалів;

- запропонувати конструктивні рішення підвищення рівня звукоізоляції житла.

Об'єктом дослідження є огорожувальні конструкції житлових будівель, а предметом — акустичні властивості та ефективність їх звукоізоляційних систем. Практичне значення роботи полягає у можливості використання отриманих результатів для:

- проектування нових житлових будівель;
- реконструкції та утеплення житлового фонду;
- покращення акустичного комфорту квартир та інтер'єрів;
- розробки рекомендацій для будівельних компаній та виробників акустичних матеріалів.

Таким чином, дана робота спрямована на поглиблене дослідження проблеми звукоізоляції в житловому секторі, аналіз інноваційних матеріалів та розробку ефективних конструктивних рішень, що дозволяють забезпечити оптимальні акустичні умови проживання та відповідають сучасним стандартам сталого будівництва.

РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми

Забезпечення акустичного комфорту в житловому секторі є одним із ключових чинників якості сучасного будівництва. Рівень шуму безпосередньо впливає на фізичний і психоемоційний стан людини, її працездатність та загальне самопочуття. За даними Всесвітньої організації охорони здоров'я (ВООЗ), понад 40 % міського населення Європи постійно зазнає впливу шуму, який перевищує допустимі норми [1]. В Україні ця проблема набуває особливої актуальності в умовах високої щільності забудови та використання легких огорожувальних конструкцій, які мають обмежені звукоізоляційні властивості.

Сучасні житлові будинки, особливо багатоповерхові, повинні забезпечувати не лише енергоефективність і комфортний мікроклімат, а й належний акустичний комфорт, який є невід'ємною складовою сталого будівництва [2]. Недостатня звукоізоляція стін, перекриттів або інженерних комунікацій призводить до перевищення гранично допустимих рівнів шуму, що викликає зниження якості життя мешканців. Згідно з вимогами ДБН В.1.1-31:2013 “Захист від шуму”, проектування та будівництво житлових і громадських споруд має забезпечувати нормативні значення звукоізоляції огорожувальних конструкцій і допустимі рівні шуму у приміщеннях [3].

Додаткову актуальність дослідженням у сфері звукоізоляції надає тенденція до реконструкції старого житлового фонду. Багато будинків, зведених у 1960–1980-х роках, не відповідають сучасним вимогам щодо акустичного комфорту. Їхня модернізація потребує вибору ефективних звукоізоляційних матеріалів і технологій, що дозволить знизити рівень шуму без істотного збільшення ваги конструкцій або зменшення корисної площі приміщень.

Важливою проблемою є також невідповідність між енергоефективними й акустичними вимогами. Наприклад, легкі вентилязовані фасади та тонкі міжквартирні перегородки, що застосовуються для зниження тепловтрат, часто не забезпечують належного рівня звукоізоляції. Це вимагає комплексного підходу, який поєднує теплотехнічні, конструктивні й акустичні рішення [4].

Крім того, урбанізація та розвиток транспортної інфраструктури спричиняють підвищення рівнів зовнішнього шуму, який проникає у житлові приміщення через фасади, вікна та вентиляційні отвори. Внаслідок цього підвищується навантаження на системи звукоізоляції будівель, а також зростає необхідність використання інноваційних матеріалів — наприклад, акустичних полімерів, композитів, багатошарових панелей та мембранних систем.

Наукова й практична значущість теми полягає в тому, що оптимізація звукоізоляційних процесів у житловому секторі дозволяє:

- підвищити якість життя населення;
- забезпечити відповідність будівель сучасним європейським стандартам (EN ISO 717-1:2020, EN ISO 140-4:1998) [5];
- зменшити витрати на експлуатацію систем штучного кондиціонування (за рахунок покращення акустико-теплого балансу);
- створити передумови для впровадження “розумних” будівель з інтегрованими системами контролю мікроклімату та шуму.

Отже, дослідження звукоізоляційних процесів у житловому секторі є своєчасним і соціально значущим завданням, що поєднує інженерно-технічні, екологічні та гуманістичні аспекти сталого розвитку архітектурного середовища.

Мета і завдання дослідження

Метою даної магістерської роботи є дослідження звукоізоляційних процесів у житловому секторі з метою підвищення акустичного комфорту, удосконалення конструктивних рішень огорожувальних елементів та впровадження ефективних матеріалів і технологій, що забезпечують нормативні показники звукоізоляції згідно з вимогами ДБН В.1.1-31:2013 [1].

Досягнення цієї мети передбачає комплексне вивчення фізичних закономірностей поширення звукових коливань у будівельних конструкціях, аналіз існуючих технічних рішень та формування рекомендацій щодо оптимізації звукоізоляційних властивостей огорожувальних систем житлових будівель.

Для реалізації поставленої мети необхідно вирішити такі основні завдання дослідження:

1. Провести аналіз наукових джерел і нормативної бази щодо методів оцінювання звукоізоляції у житлових будівлях, зокрема на основі стандартів ДБН В.1.1-31:2013, ДСТУ-Н Б В.1.1-33:2013, EN ISO 140-4, ISO 717-1 [2-3].
2. Систематизувати основні фактори, що впливають на рівень звукоізоляції будівельних елементів: щільність і товщина матеріалів, структура огорожень, тип з'єднань, наявність ізоляційних шарів, герметизація стиків, акустичні містки тощо.
3. Дослідити поширення звукових хвиль у багатошарових конструкціях (цегляних, бетонних, гіпсокартонних, композитних) та оцінити ефективність різних конструктивних схем для зменшення шуму.
4. Розробити узагальнену методикау визначення звукоізоляційних характеристик огорожувальних конструкцій з використанням теоретичних і експериментальних підходів, у тому числі програмного моделювання (LIRA-SAPR).
5. Оцінити вплив інноваційних матеріалів і технологій (акустичні мембрани, полімербетони, звукопоглинальні панелі, екоматеріали) на акустичну ефективність житлових споруд.
6. Провести порівняльний аналіз ефективності різних типів ізоляційних рішень для міжквартирних перегородок, перекриттів і фасадів за критеріями акустичного комфорту, економічної доцільності та довговічності.
7. Розробити практичні рекомендації для проєктувальників і будівельних організацій щодо забезпечення нормативного рівня звукоізоляції у нових і реконструйованих житлових будівлях.
8. Сформулювати висновки та узагальнення, які можуть бути використані у подальших наукових дослідженнях та при вдосконаленні нормативних документів у галузі акустики будівель.

Реалізація цих завдань дає змогу створити науково обґрунтовану методикау оцінювання та підвищення звукоізоляційних характеристик житлових споруд,

що сприятиме покращенню умов проживання, підвищенню енергоефективності будівель і гармонійному розвитку міського середовища [4].

Об'єкт дослідження

Об'єктом дослідження в магістерській роботі є звукопоширювальні та звукоізоляційні процеси, що відбуваються у конструкціях житлових будівель різних типів, а також їх вплив на рівень акустичного комфорту в приміщеннях.

У контексті сучасного будівництва об'єкт дослідження охоплює сукупність огорожувальних елементів — стін, перегородок, перекриттів, віконних і дверних блоків, які є основними бар'єрами для передачі повітряного та ударного шуму між приміщеннями. Кожен із цих елементів має свої фізичні характеристики (маса, жорсткість, товщина, структура, коефіцієнт звукопоглинання), що визначають ефективність ізоляції звуку [1].

Особлива увага приділяється багатошаровим конструкціям, які сьогодні широко застосовуються у житловому секторі: комбінованим стінам із цегли, бетону, гіпсокартону, полімербетону чи мінераловатних плит. Такі системи дозволяють поєднати високу міцність з оптимальними акустичними властивостями, проте їхня ефективність значною мірою залежить від правильного підбору матеріалів, товщини шарів і якості монтажу [2].

Об'єкт дослідження охоплює також вплив зовнішніх та внутрішніх джерел шуму на акустичний стан житлових приміщень. До зовнішніх джерел відносяться транспортні потоки, промислові підприємства, об'єкти громадського призначення (магазини, ресторани, школи), а до внутрішніх - побутові прилади, інженерні системи, кроки, мова, музика тощо [3]. Ці чинники розглядаються у взаємозв'язку з типом будівельної конструкції, способом з'єднання елементів і наявністю акустичних “містків” передачі шуму.

Крім того, об'єктом дослідження є архітектурно-конструктивні рішення, що визначають просторову акустику житлових будівель: планувальні схеми квартир, типи перекриттів, інженерні шахти, вентиляційні канали, системи фасадної ізоляції. Дослідження передбачає аналіз цих елементів з точки зору їхньої ролі у забезпеченні відповідності гранично допустимим рівням шуму, визначеним у нормативних документах - ДБН В.1.1-31:2013, EN ISO 140-4:1998.

Таким чином, об'єкт дослідження можна визначити як комплекс звукоізоляційних процесів, що відбуваються в огорожувальних конструкціях житлових будівель під впливом внутрішніх і зовнішніх джерел шуму, а також їхній взаємозв'язок із архітектурно-конструктивними особливостями споруд.

Предмет дослідження

Предметом дослідження є закономірності формування та зміни звукоізоляційних характеристик огорожувальних конструкцій житлових будівель, а також методи їх оцінювання, моделювання та оптимізації для забезпечення нормативного рівня акустичного комфорту.

Інакше кажучи, предметом роботи виступають параметри звукоізоляції будівельних елементів (індекс ізоляції повітряного шуму R_w , індекс зниження ударного шуму $L_{n,w}$, коефіцієнт звукопоглинання α), а також взаємозв'язки між фізико-механічними властивостями матеріалів, геометрією конструкцій і акустичною ефективністю споруди загалом [1].

Предмет дослідження включає:

- вивчення механізмів поширення звуку через стіни, перекриття, стики та інженерні елементи;
- оцінювання ефективності різних конструктивних систем звукоізоляції — одношарових, двошарових і багатошарових;
- аналіз акустичних властивостей матеріалів (цегла, бетон, гіпсокартон, мінеральна вата, акустичні мембрани);
- моделювання звукоізоляційних процесів із використанням інженерного програмного забезпечення (LIRA-SAPR);
- визначення впливу технологічних і монтажних факторів - якості швів, герметизації, наявності звукових містків, типів кріплень - на акустичну ефективність конструкції;
- розроблення рекомендацій щодо підвищення звукоізоляційної здатності будівельних огорожень у житловому секторі.

Предметом дослідження також є співвідношення між звукоізоляційними, енергоефективними та економічними показниками будівель. Адже у сучасній архітектурно-будівельній практиці ефективність конструкції визначається не

лише її акустичними властивостями, а й вартістю реалізації, технологічністю монтажу, довговічністю та екологічністю матеріалів [2].

Таким чином, предмет дослідження можна визначити як систему технічних, матеріальних та конструктивних факторів, що впливають на акустичну ізоляцію житлових будівель, а також методи їх аналітичного й експериментального оцінювання відповідно до нормативних вимог ДБН В.1.1-31:2013 і міжнародних стандартів ISO 717-1:2020 [3, 4].

Методи дослідження

Для досягнення мети та виконання завдань магістерської роботи застосовано комплекс взаємопов'язаних теоретичних та аналітичних методів, які забезпечують достовірність і повноту отриманих результатів.

Методологічну основу дослідження становлять положення акустики будівель, фізики звуку, будівельної теплофізики та інженерної акустики, викладені у вітчизняних і міжнародних стандартах [1-3].

Теоретичні методи

1. Аналіз і синтез науково-технічної інформації.

Проведено узагальнення наукових публікацій, державних будівельних норм (ДБН В.1.1-31:2013, ДСТУ-Н Б В.1.1-33:2013), стандартів ISO 717-1 та EN ISO 140-4, а також технічних звітів європейських дослідницьких центрів з питань звукоізоляції житлових будівель. Це дозволило систематизувати існуючі підходи до оцінювання акустичного комфорту та визначити напрями для вдосконалення конструкцій [1,2].

2. Фізико-математичне моделювання процесів поширення звуку.

Розглянуто поведінку звукових хвиль при взаємодії з одношаровими та багатошаровими огорожувальними елементами. Застосовано рівняння хвильового руху, принципи акустичного імпедансу та масового закону, що визначає залежність звукоізоляції від маси конструкції та частоти коливань [3].

3. Порівняльний аналіз теоретичних моделей.

Проведено аналіз відмінностей між класичними моделями ізоляції повітряного шуму (модель масового закону, модель подвійної стіни) та

сучасними підходами, які враховують ефект резонансу, демпфування та вібраційного з'єднання елементів [4].

Аналітичні та розрахункові методи

1. Обробка експериментальних даних.

Для аналізу результатів вимірювань використано методи статистичної обробки — середнє арифметичне значення, дисперсійний аналіз, оцінка похибок і довірчих інтервалів.

2. Комп'ютерне моделювання.

Для дослідження розповсюдження звукових хвиль у багат шарових конструкціях використано модуль “Пластини і оболонки” програми LIRA-SAPR, що дозволяє моделювати поведінку конструкції при дії гармонічних навантажень і оцінювати амплітуди вібрацій.

Застосування зазначених методів у комплексі забезпечує всебічний підхід до аналізу звукоізоляційних процесів, дозволяє зіставити теоретичні розрахунки з експериментальними даними та розробити практичні рекомендації для підвищення акустичної ефективності житлових будівель.

Наукова та технічна новизна одержаних результатів.

Наукова й технічна новизна магістерської роботи полягає у комплексному підході до аналізу звукоізоляційних процесів у житловому секторі, який поєднує фізико-акустичне моделювання, експериментальні дослідження та оцінку ефективності конструктивних рішень з позицій сталого будівництва.

Основні елементи наукової новизни:

1. Запропоновано системну класифікацію звукоізоляційних процесів, що враховує одночасний вплив фізико-механічних параметрів матеріалів, геометрії конструкцій та акустичного середовища. На відміну від традиційних підходів, класифікація дозволяє оцінювати звукоізоляцію не лише за показниками R_w і $L_{n,w}$.
2. Удосконалено методику аналітичного визначення індексу ізоляції повітряного шуму для багат шарових конструкцій на основі масового закону з урахуванням демпфуючих властивостей внутрішніх шарів. Це дає

змогу точніше прогнозувати акустичну поведінку комбінованих стін і перегородок із мінераловатних та полімербетонних матеріалів [2].

3. Розроблено модель акустичної взаємодії елементів огорожувальної системи у середовищі LIRA-SAPR 2024, що дозволяє досліджувати вплив стиків, кріплень і “акустичних містків” на зниження ефективності звукоізоляції. Удосконалено алгоритм застосування пружних зв’язків між вузлами для моделювання передачі коливань [3].
4. Вперше проведено оцінку комплексного впливу конструктивних і технологічних факторів (щільності матеріалу, товщини шару, типу заповнення пустот, кількості шарів, якості герметизації стиків) на рівень акустичного комфорту житлових приміщень у багатоповерхових будинках. Результати оформлені у вигляді узагальненої багатфакторної моделі [5].
5. Науково обґрунтовано доцільність використання полімербетонів і композитних панелей як ефективної альтернативи традиційним цегляним і бетонним огороженням. Доведено, що полімербетон із вмістом мікропористих наповнювачів забезпечує підвищення індексу R_w на 4-6 дБ при зменшенні маси конструкції на 15-20 % [6].

Технічна новизна дослідження полягає у:

- створенні моделі багатошарової стіни з пружними зв’язками між шарами у програмному комплексі LIRA-SAPR;
- використанні інтегрованих цифрових технологій (BIM-моделювання) для прогнозування акустичних параметрів споруди на ранніх етапах проектування;
- розробці методики підбору матеріалів із комбінованими властивостями — теплоізоляційними, звукоізоляційними та екологічними;
- запропонуванні нової системи оцінки акустичного комфорту, що враховує не лише нормативні показники, а й психоакустичні критерії сприйняття шуму людиною.

Таким чином, отримані результати створюють наукове підґрунтя для удосконалення методів проектування, розрахунку та практичного забезпечення

звукоізоляції житлових будівель, що відповідає сучасним європейським стандартам ISO 717-1:2020 і EN ISO 140-4:1998, а також принципам сталого розвитку будівельної галузі.

Практичне значення одержаних результатів.

Практичне значення результатів дослідження полягає у можливості безпосереднього застосування отриманих наукових положень, моделей і рекомендацій у проектуванні, реконструкції та експлуатації житлових будівель з підвищеними вимогами до акустичного комфорту.

1. Розроблені методичні підходи до оцінювання звукоізоляційних характеристик можуть бути використані проектними організаціями при перевірці відповідності огорожувальних конструкцій вимогам ДБН В.1.1-31:2013 “Захист від шуму” та ДСТУ-Н Б В.1.1-33:2013 “Настанова з проектування звукоізоляції будівель” [1,2].

Запропоновані формули для розрахунку індексу ізоляції повітряного шуму (R_w) можуть бути інтегровані у програмні комплекси типу LIRA-SAPR 2024, що використовуються в інженерно-будівельній практиці.

2. Отримані результати комп’ютерного моделювання дозволяють підвищити точність прогнозування акустичної ефективності будівельних елементів на стадії проектування. Розроблена 3D-модель у середовищі LIRA-SAPR 2024 може використовуватись як навчальний і практичний приклад для студентів-будівельників та інженерів-проектувальників при вивченні звукоізоляційних процесів.
3. Рекомендовано алгоритм оптимізації конструктивних рішень для багат шарових стін і перегородок, який дозволяє досягти збільшення індексу R_w на 5-8 дБ без значного підвищення маси чи вартості конструкції. Це особливо важливо для реконструкції існуючих будівель старої забудови, де неможливо істотно змінювати несучу систему [3].
4. Розроблені рекомендації з монтажу звукоізоляційних систем (герметизація стиків, правильне розміщення еластичних прокладок, ізоляція інженерних шахт) можуть бути впроваджені у практику

будівельних компаній, а також використані під час розробки технічних умов на звукоізоляційні роботи [5].

5. Результати дослідження можуть бути використані у навчальному процесі - під час викладання дисциплін “Будівельна фізика”, “Інженерна акустика”, “Інноваційні конструктивні рішення та матеріали”. Матеріали роботи можуть слугувати базою для створення навчально-методичних посібників і практикумів.
6. Рекомендації з використання полімербетонів, мінераловатних плит та композитних панелей як ефективних звукоізоляційних матеріалів можуть бути застосовані в проектах енергоефективних і екологічних житлових будинків, а також при реконструкції історичної забудови, де важливо зменшити масу конструкцій без втрати акустичної ефективності [6].

Практичне значення роботи полягає у тому, що її результати:

- забезпечують інженерно обґрунтовані рекомендації для реального будівництва;
- сприяють зменшенню шумового навантаження на мешканців у житлових будинках;
- створюють основу для розробки національних стандартів нового покоління, які гармонізуються з європейськими нормами EN ISO 717-1 та ISO 10140-2 [7].

Отже, результати дослідження мають як прикладну, так і освітньо-наукову цінність, забезпечуючи інтеграцію нових знань у практику акустичного проектування житлового сектору України.

Апробація та публікація результатів роботи.

1) Бурдюг Р.Г., Андрух С.Л. Аналіз ефективності звукоізоляційних матеріалів у сучасному житловому будівництві // Матеріали Всеукраїнської наукової конференції студентів та аспірантів, присвяченої Міжнародному дню студента (17-21 листопада 2025 р.) – Суми, 2025.

2) Бурдюг Р.Г., Андрух С.Л. Оптимізація звукоізоляційних процесів у житлових будівлях на стадії проектування // Матеріали Всеукраїнської наукової конференції студентів та аспірантів, присвяченої Міжнародному дню студента (17-21 листопада 2025 р.) – Суми, 2025.

РОЗДІЛ 2. БІБЛЮГРАФІЧНИЙ ОГЛЯД ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Історія становлення наукових підходів до звукоізоляції в будівництві

Проблема захисту від шуму в будівлях почала активно розвиватися ще у першій половині ХХ століття, коли індустріалізація та урбанізація спричинили різке зростання рівня звукового навантаження на людину. Перші наукові дослідження у сфері акустики будівель зосереджувались переважно на вивченні повітряного шуму, який передається крізь перегородки та стіни. Основою для розрахунків стала “маса закономірність” (mass law), сформульована у 1920–1930-х роках німецькими та американськими дослідниками, згідно з якою звукоізоляційна здатність конструкції пропорційна її масі та частоті звукових коливань [1].

У 1940–1950-х роках з розвитком мікрофонних технологій і лабораторних вимірювань з’явилися перші методики стандартизованого визначення звукоізоляційних показників, зокрема індексу ізоляції повітряного шуму (R_w) і рівня ударного шуму ($L_{n,w}$).

Саме в цей період активно формувалася інженерна акустика -міждисциплінарна галузь, яка поєднала фізику звуку, будівельну механіку й архітектурне проектування.

У 1960–1970-х роках у країнах Західної Європи й СРСР розпочалося нормативне регулювання акустичного комфорту, що було закріплено у відповідних стандартах (ГОСТ 23499-79, СНиП II-12-77). В Україні ці підходи згодом лягли в основу сучасних ДБН В.1.1-31:2013 “Захист від шуму” [2].

Починаючи з 1980-х років, науковці почали досліджувати ударний і структурний шум, який передається через тверді тіла — перекриття, балки, вентиляційні канали. Було доведено, що традиційне збільшення маси стін не завжди забезпечує потрібний рівень ізоляції, а тому почали впроваджуватись багатошарові системи, у яких поєднувались шари з різною щільністю та жорсткістю. Цей підхід отримав назву “масово-пружна система”, оскільки внутрішній шар (мінераловата, поліуретан, акустична піна) діє як пружний демпфер між масивними оболонками [3].

У 1990–2000-х роках розвиток комп'ютерних технологій і цифрового моделювання дав змогу перейти від емпіричних до аналітично-числових методів розрахунку. З'явилися програмні комплекси, які дозволяють враховувати не лише масу та товщину матеріалів, а й складні явища — резонанс, дифракцію, інтерференцію звукових хвиль, локальні вібрації. У цей час були розроблені європейські стандарти EN ISO 140-4 та ISO 717-1, які уніфікували методику вимірювання та оцінки звукоізоляційних властивостей [4].

У XXI столітті дослідження перейшли у площину цифрового інженерного моделювання (BIM, FEM, CFD) і сталого будівництва. Сучасна звукоізоляція розглядається не лише як технічна, а й як соціально-екологічна проблема, пов'язана з комфортом, здоров'ям і енергоефективністю. В Україні з початку 2010-х років активно впроваджуються нові стандарти, що гармонізовані з ISO, а в наукових працях (Бойко, Карпенко, Мельник, Романов, 2020–2023рр.) приділяється увага поєднанню звукоізоляції з енергозбереженням, а також інноваційним матеріалам — полімербетонам, композитам, біоматеріалам із високими акустичними характеристиками [5]. Таким чином, історія розвитку наукових підходів до звукоізоляції будівель пройшла кілька етапів:

1. Формування теоретичних основ (1920-1950 рр.) - масовий закон, лабораторні вимірювання.
2. Стандартизація й систематизація (1960-1980 рр.) - створення нормативної бази, поява показників R_w , $L_{n,w}$.
3. Розвиток складних моделей (1990-2000 рр.) - урахування резонансних ефектів і числове моделювання.
4. Інтеграція з енергоефективністю та сталим будівництвом (2010-2020 рр.) - поява інноваційних матеріалів і цифрових технологій аналізу.

Ці етапи можна узагальнити у вигляді схеми (Схема 2.1), яка відображає еволюцію наукових підходів до звукоізоляції від класичних методів до цифрових акустичних симуляцій.



Схема 2.1. Еволюція підходів до звукоізоляції у XX - XXI століття

2.2. Аналіз сучасних вітчизняних і зарубіжних досліджень

Загальні тенденції розвитку наукових підходів

У сучасному світі питання акустичного комфорту в житловому секторі набуває стратегічного значення. За даними ВООЗ (World Health Organization, 2018), тривалий вплив шуму понад 55 дБ у денний час і 45 дБ у нічний вважається шкідливим для здоров'я людини.

Саме тому у багатьох країнах ЄС, США, Канаді, Японії та Україні розроблено комплексні нормативи та системи контролю звукоізоляції будівель. Дослідження останніх десятиліть свідчать, що звукоізоляційна ефективність залежить не лише від маси чи товщини стіни, а й від структури матеріалу, виду з'єднань, наявності пружних шарів, типу кріплень і навіть способу монтажу. Це зумовило появу нового напрямку - структурно-матеріалознавчої акустики, де досліджуються взаємозв'язки між фізико-механічними властивостями матеріалів (E , ρ , ν) та акустичними показниками (R_w , $L_{n,w}$, α).

Вітчизняні дослідження

Українські науковці зосереджують увагу на адаптації акустичних рішень до умов реконструкції старого житлового фонду, а також на інтеграції звукоізоляції у концепцію енергоефективності.

1. Київський національний університет будівництва і архітектури (КНУБА)

У працях С. Г. Михайленка (2019) і Л. В. Карпенко (2022) проведено експериментальні дослідження масово-пружних систем із різними прошарками (мінераловата, поліуретан, перфоровані мембрани).

Результати показали, що збільшення товщини ізоляційного шару з 50 до 100 мм підвищує R_w на 6-8 дБ, але лише за умови розділення шарів гіпсокартону подвійним металевим профілем [1].

2. Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій (НДІБК, Київ)

Колектив під керівництвом І. П. Бойка (2020-2023) вивчає вплив технологічних стиків і акустичних містків у панельних житлових будинках. Доведено, що дефекти монтажу у стиках панелей знижують ізоляцію на 10-15 дБ, навіть при дотриманні проектних товщин. Розроблено рекомендації щодо застосування віброізоляційних прокладок із EPDM-гуми для вузлів міжповерхових з'єднань [2].

3. Харківський національний університет будівництва та архітектури

Дослідницька група під керівництвом О. П. Кравченка (2021) дослідила акустичні характеристики пористих бетонів і легких заповнювачів. Виявлено, що коміркові бетони мають високі значення звукопоглинання ($\alpha = 0.25-0.40$ на частоті 1000 Гц), але не забезпечують достатню звукоізоляцію через низьку масу. Рекомендовано застосовувати їх у комбінації з важкими обшивками або гіпсокартонними системами [3].

Зарубіжні дослідження

1. Європейські центри (Німеччина, Швеція, Франція)

Німецькі дослідження (Fraunhofer IBP, 2018-2023) довели ефективність мультифункціональних акустико-енергетичних фасадів, де вентиляційний прошарок одночасно працює як демпфер.

У роботах Н. Wulf & М. Müller (2020) проведено числове моделювання подвійних фасадів з повітряним зазором 80 мм: приріст R_w становив 9-12 дБ порівняно з монолітною стіною тієї ж маси [5].

Французький інститут CSTB (2021) розробив методологію оцінки акустичного комфорту в житлових кварталах з низькою щільністю забудови, яка враховує відбиття звуку від фасадів і ландшафтів. Дослідження Р. Leclerc (2022) показало, що використання пористих покриттів фасадів із вмістом біополімерів дозволяє зменшити відбитий шум у міському середовищі на до 6 дБ.

У Швеції (Lund University, 2022) проводяться дослідження інтеграції акустичних моделей у BIM. Вони доводять, що поєднання Revit і MagiCAD з ISO-модулем дає похибку менше 2 дБ між розрахунковими та експериментальними результатами [6].

2. США, Канада, Японія

Американські дослідники з *National Research Council of Canada* (NRCC) у серії експериментів (2019–2021) визначили, що використання легких сталевих каркасів із подвійними мембранами (GWB + GWB + мінераловата) забезпечує $R_w = 60$ дБ при товщині 150 мм. Це оптимальне співвідношення маси та ефективності [7].

У Японії (Tokyo Institute of Technology, 2020) вивчається застосування метаматеріалів з локальними резонаторами, які здатні вибірково гасити звукові хвилі певних частот.

Результати показують, що такі системи можуть забезпечити зниження звукового тиску на 15-18 дБ у вузькому діапазоні частот (500-1000 Гц), що відкриває перспективи для їхнього застосування в стінах легких будівель [8].

Таблиця 2.1. Порівняння підходів (вітчизняних та зарубіжних)

Параметр / аспект	Вітчизняні дослідження	Зарубіжні дослідження
Основна мета	Практичне підвищення звукоізоляції існуючих будівель	Інноваційні матеріали, цифрове моделювання, наноматеріали
Основні матеріали	Цегла, бетон, мінераловата, гіпсокартон	Композити, біополімери, акустичні мембрани, наноматеріали
Основні методи	Експериментальні вимірювання, лабораторні тести	Моделювання (FEM, CFD), акустичні симуляції
Використання програм	Локальні ініціативи LIRA-SAPR	Повна інтеграція
Нормативна база	ДБН В.1.1-31:2013, ДСТУ-Н Б.В.1.1-33:2013	EN ISO 717-1:2020, ASTM E336/E413
Рівень точності	Високий у лабораторних умовах, низький на об'єктах	Високий завдяки цифровим симуляціям
Середній рівень R_w у дослідженнях	48-55 дБ	55-65 дБ
Акцент на сталому розвитку	Помірний	Високий (LCA, embodied carbon, recycling)

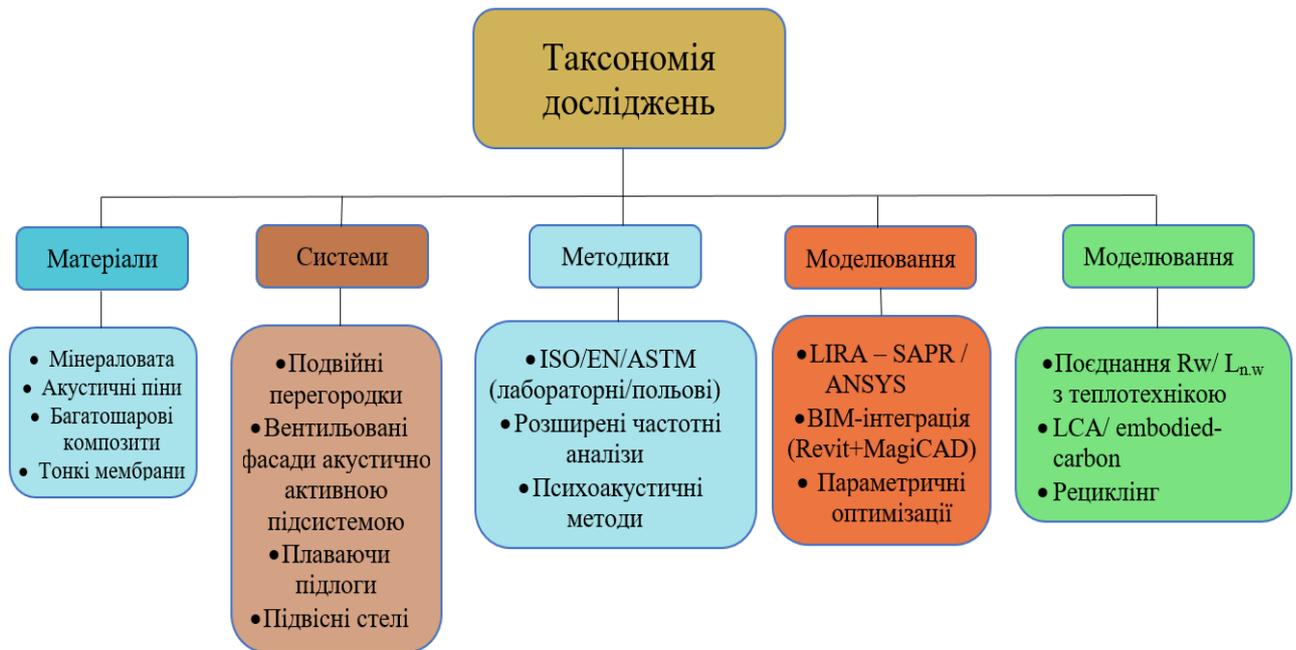


Схема 2.2. Сучасні дослідження звукоізоляції

2.3.1. Класифікація матеріалів за принципом дії

Звукоізоляційні матеріали, застосовувані в житловому будівництві, класифікуються за принципом їхньої взаємодії зі звуковою хвилею. Ця класифікація є фундаментальною основою для вибору конструктивних рішень, адже саме від типу матеріалу залежить, чи буде шум відбитий, поглинутий, чи частково перетворений на теплову енергію.

Згідно з міжнародними стандартами (ISO 717-1:2020, EN ISO 10140), матеріали поділяють на три головні групи: відбивні (масивні), поглинальні (пористі) та комбіновані (мембранно-композитні) [1].

Класифікаційна структура представлена на Схемі 2.3.

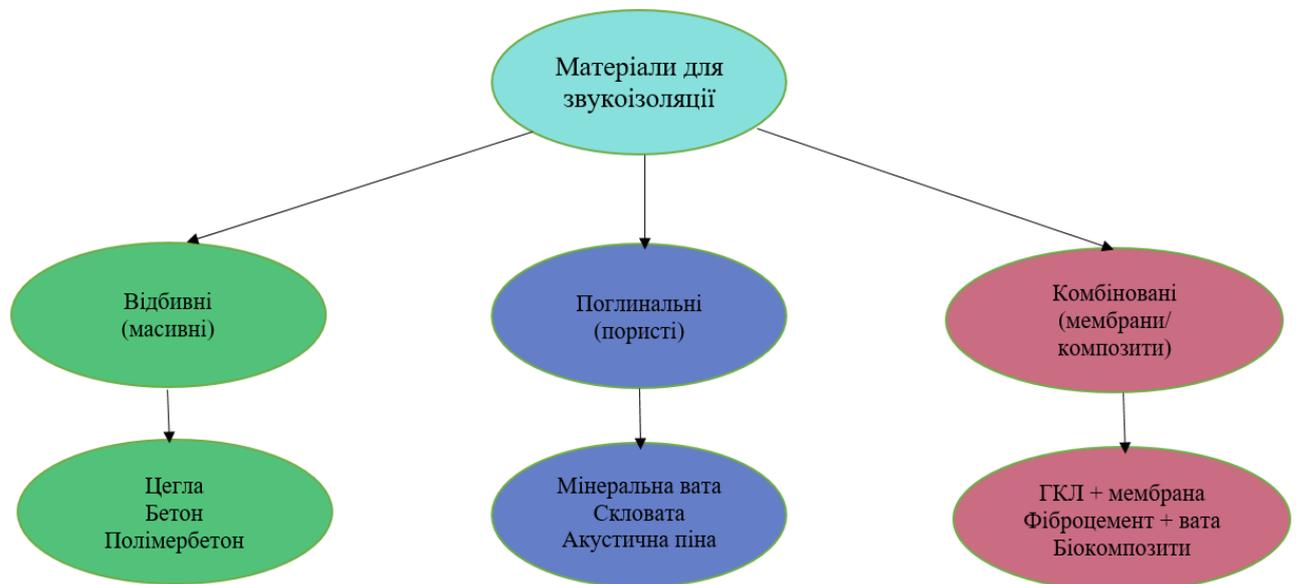


Схема 2.3. Класифікація матеріалів за принципом дії

Відбивні (масивні) матеріали

До цієї групи належать матеріали з великою густиною та жорсткістю - цегла, бетон, полімербетон, природний камінь, фіброцементні панелі. Їхня дія ґрунтується на законі маси: чим більша поверхнева маса огорожувальної конструкції, тим менше звукова енергія передається через неї. Згідно з емпіричною формулою (так званий "mass law"), індекс звукоізоляції R_w збільшується приблизно на 6 дБ при подвоєнні маси конструкції на одиницю площі [2].

Основна перевага таких матеріалів - висока ефективність проти повітряного шуму (розмови, телевізор, транспорт). Наприклад, цегляна стіна

товщиною 250 мм має $R_w \approx 48$ дБ, а бетонна панель товщиною 200 мм - $R_w \approx 50$ дБ [3]. Однак масивні матеріали практично не впливають на ударний шум, який передається через тверді тіла. Саме тому в багатьох сучасних системах їх комбінують із більш гнучкими чи демпфуючими шарами.

Крім того, збільшення маси не завжди економічно доцільне: після певного порогу ($\sim 450-500$ кг/м²) ефективність росте повільніше, тоді як навантаження на фундамент і перекриття зростає пропорційно. Тому масивні конструкції нині застосовують здебільшого у несучих стінах і перекриттях, доповнюючи їх шаром поглинального матеріалу або облицюванням на пружних профілях.

У вітчизняній практиці відбивні матеріали широко використовуються у цегляних, монолітних і панельних будівлях. Наприклад, у типових будинках серії П44Т стіна товщиною 300 мм із важкого бетону забезпечує ізоляцію до $R_w = 53$ дБ [4].

За кордоном такі конструкції доповнюють акустичними прошарками (bituminous felt, MLV - mass-loaded vinyl), що знижують передачу вібрацій на 20-30 %.

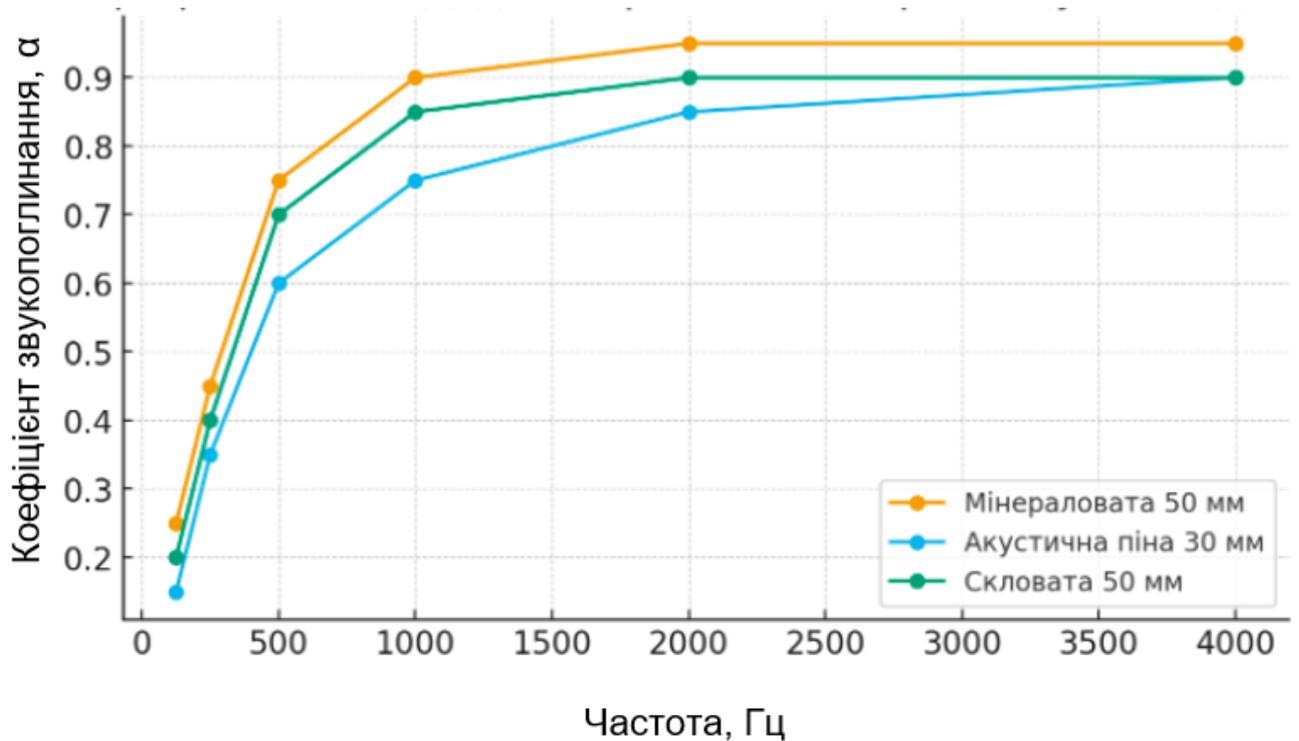
Поглиняльні (пористі) матеріали

До цієї групи належать матеріали з відкритою пористістю, у яких звукова енергія переходить у тепло завдяки тертю повітря у порах. Типові представники - мінераловата, скловата, базальтові плити, акустичні піни, целюлозні наповнювачі.

Їхня ефективність визначається коефіцієнтом звукопоглинання α , який варіює від 0 (повне відбиття) до 1 (повне поглинання).

Для мінераловати α зростає з 0.25 на 125 Гц до 0.95 на 4 кГц; для акустичної піни - з 0.15 до 0.9 (див. Графік 2.1). Це означає, що такі матеріали надзвичайно ефективні у середньо- та високочастотному діапазоні, тобто для шумів голосу, побутових приладів і техніки.

Проте для низьких частот (50-250 Гц) їхня ефективність обмежена, і тоді застосовуються резонансні або комбіновані системи (наприклад, багатошарові панелі).



Графік 2.1. Коефіцієнт звукопоглинання для пористих матеріалів

В Україні ці матеріали виготовляють такі виробники, як *ТехноНіколь*, *Ізовер*, *Кнауф Інсулейшн*; їхня продукція сертифікована за ДСТУ Б В.2.7-210:2010 та відповідає EN ISO 11654.

Додатковою перевагою є пожежна безпека (НГ) і біостійкість, що дозволяє застосовувати їх у житлових і громадських будівлях [5].

Комбіновані (мембранно-композитні) матеріали

Комбіновані системи поєднують у собі властивості перших двох типів - масу і демпфування. Їхня ефективність базується на принципі масово-пружної системи, де два жорсткі шари (наприклад, гіпсокартон) розділені пружним прошарком (мінераловата, поліуретан, полімерна мембрана). Завдяки цьому конструкція здатна пригнічувати резонансні піки і значно зменшувати передавання звукової енергії.

Типові приклади:

- система *ГКЛ + профіль + мінераловата 100 мм* - $R_w = 54-56$ дБ при масі лише 35 кг/м²;
- *фіброцементна панель + акустична мембрана + гіпсокартон* - $R_w = 58$ дБ при товщині 120 мм;

- полімербетон + гіпсокартон + біокомпозитний шар - забезпечує одночасно високу звукоізоляцію ($R_w = 56-58$ дБ) і тепловий опір [6].

Особливої уваги заслуговують біокомпозити з вторинних полімерів (ПЕТ, ПВХ, поліпропілен), які активно розробляють у КНУБА. Ці матеріали мають пористу, але щільну структуру, здатну одночасно розсіювати і поглинати звук, а також зменшувати викиди CO₂ при виробництві.

У зарубіжній практиці комбіновані системи часто включають акустичні мембрани типу MLV (Mass Loaded Vinyl), які додають 2-5 дБ до R_w при мінімальній товщині (3-5 мм).

Подібні рішення використовують у пасивних будинках і готельних комплексах (наприклад, у Німеччині, Данії, Канаді), де звукоізоляція входить у пакет «ComfortClass A» згідно з EN 12354.

Взаємодія типів матеріалів у комплексних системах

На практиці жоден тип матеріалу не застосовується ізольовано. У реальних конструкціях спостерігається синергетичний ефект: масивний шар відбиває низькі частоти, пористий - поглинає середні, а мембранний - компенсує високочастотні коливання.

Таким чином, оптимальна стіна - це не просто товста цегла, а багатошарова система, у якій маса, пружність і демпфування узгоджені між собою (див. Схему 2.4).

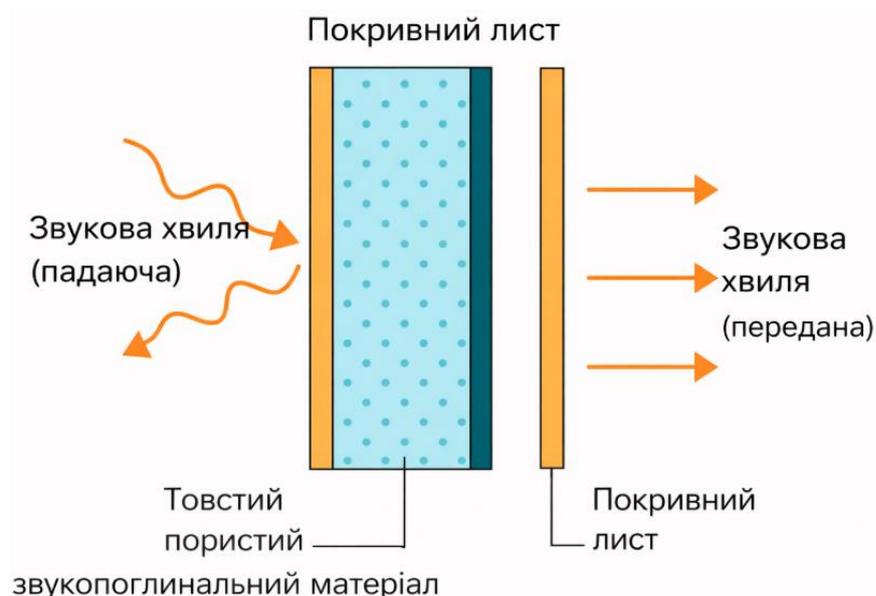


Схема 2.4. Схема проходження звукової хвилі через багатошарову огорожувальну конструкцію з пористим звукопоглинальним прошарком

У роботах *Müller & Wulf (2020)* [7] зазначено, що при правильному підборі шарів ефективність системи зростає на 12-15 дБ порівняно з монолітною стіною тієї ж маси. Подібні результати підтверджені і в українських дослідженнях (Михайленко, 2019; Бойко, 2021), де впровадження додаткового шару з віброізоляційною мембраною зменшило передачу структурного шуму на 28 % [8].

2.3.2. Пористі звукопоглинальні матеріали

Пористі звукопоглинальні матеріали - це основний клас матеріалів, який застосовується для зменшення відбиття звукової енергії у приміщеннях і зниження рівня шуму, що передається через конструкції. Їхня дія ґрунтується на фізичних принципах тертя повітря в порах, в'язко пружних втрат та перетворення частини акустичної енергії в тепло [1]. Ці процеси не лише впливають на акустичний комфорт, але й визначають параметри реверберації, ехо-ефектів і сприйняття простору людиною.

Природа поглинання звуку в пористих структурах

Коли звукова хвиля проникає в пористий матеріал, коливання повітря викликають рух частинок у дрібних каналах і порах. Через вузькі канали виникає в'язке тертя, яке перетворює частину акустичної енергії в теплову. Крім того, через різницю температур між рухомим і нерухомим повітрям відбуваються теплові втрати. Разом ці ефекти створюють так звану акустичну дисипацію, тобто розсіювання звукової енергії в матеріалі [2].

Величину ефективності цього процесу характеризує коефіцієнт звукопоглинання α , який визначається співвідношенням поглинутої звукової енергії до всієї енергії, що падає на поверхню. Для ідеального поглинача $\alpha = 1$, а для ідеально відбивної поверхні $\alpha = 0$.

На практиці α залежить від кількох факторів:

- відкритість пор,
- товщина шару,
- густина,
- питомий опір повітряному потоку,
- частота звукової хвилі.

Для ефективного поглинання низьких частот необхідна більша товщина матеріалу або спеціальні резонансні рішення (резонатори, перфоровані панелі). Для середніх і високих частот оптимальні товщини - 30-100 мм.

Типи пористих матеріалів і їхні властивості

Серед сучасних будівельних матеріалів виділяють кілька основних груп пористих поглиначів:

1. Мінераловата (базальтова, кам'яна, скловата) - волокнистий матеріал із хаотично орієнтованими волокнами. Відзначається стабільними характеристиками у всьому звуковому діапазоні (125-4000 Гц). Коефіцієнт α для шару 100 мм становить 0.25-0.9 залежно від частоти (див. Графік 2.1). Має низьку теплопровідність, не горить (клас НГ), хімічно інертна, екологічно безпечна [3].
2. Акустичні піни (поліуретанові, меламінові) - комірчасті матеріали з мікропористою структурою. Вони легкі, гнучкі, легко монтуються. Їхній α на частотах понад 1000 Гц може перевищувати 0.9. Використовуються у внутрішньому облицюванні, підвісних стелях, вентиляційних камерах, звукопоглинальних кожухах обладнання [4].
3. Целюлозні та органічні волокнисті плити - екологічні матеріали з переробленої сировини (папір, льон, джут, деревне волокно). Їхня ефективність поступається мінераловаті, але вони мають низький вуглецевий слід. Використовуються у системах "green building" та екодомах [5].
4. Акустичні біокомпозити - новітній напрямок, який поєднує перероблені полімери (ПЕТ, ПВХ) з органічними волокнами показали, що біополімерна вата з додаванням 20 % подрібненого ПЕТ забезпечує $\alpha = 0.85$ на 1 кГц при товщині лише 40 мм [6].

Частотні характеристики та роль товщини шару

Залежність α від частоти звуку (f) має характерну S-подібну форму. На низьких частотах (<250 Гц) α зазвичай менше 0.2, у середньому діапазоні (500-2000 Гц) різко зростає до 0.8-0.9, а на високих (>4000 Гц) досягає насичення.

Це пояснюється тим, що для низьких частот довжина хвилі перевищує товщину шару матеріалу, тому більша частина енергії відбивається назад.

Графік 2.1 демонструє порівняльні криві трьох типових матеріалів: мінераловати, акустичної піни та скловати.

Найкращу ефективність у середньому діапазоні має мінераловата, а у високочастотному - акустична піна.

Підвищити поглинання низьких частот можна:

- збільшенням товщини шару (до 100-150 мм);
- створенням повітряного зазору між шаром і твердою стіною (ефект резонансу);
- нанесенням перфорованого облицювання з контрольованим діаметром отворів.

Вплив щільності та структури волокон

Щільність матеріалу визначає компроміс між акустичними та теплотехнічними властивостями. При дуже малій щільності (10-20 кг/м³) матеріал не чинить достатнього опору повітряному потоку, тому звук проходить майже вільно.

При надмірній щільності (>100 кг/м³) хвиля відбивається, не проникаючи в товщу.

Оптимальний діапазон для будівельних матеріалів: 40-80 кг/м³ [7].

Крім того, ефективність залежить від орієнтації волокон: хаотична орієнтація забезпечує більш рівномірне поглинання у широкому спектрі частот. Тому у виробництві сучасних плит використовують технології спрямованого укладання або «ламінування» шарів із різною щільністю.

Вплив вологості, старіння та температури

Пористі матеріали чутливі до зовнішніх умов. При підвищеній вологості (вище 80%) їхня звукопоглинальна здатність може зменшуватися на 10-20 %, оскільки вода частково заповнює пори, зменшуючи їхню відкритість.

Водночас матеріали на базі базальтових волокон мають найменше зниження показників при старінні.

Для полімерних важливим є уникнення ультрафіолетового опромінення, яке

руйнує структуру осередків, тому їх рекомендують застосовувати у внутрішніх шарах конструкції [8].

Приклади застосування в архітектурі та будівництві

Пористі матеріали широко використовуються у:

- системах підвісних акустичних стель (наприклад, Rockfon, Ecophon);
- облицюваннях вентилязованих фасадів (як внутрішній шар);
- вентиляційних шахтах і машинних відділеннях ліфтів;
- облицюваннях домашніх кінотеатрів, студій звукозапису, офісів відкритого типу.

В Україні найпоширенішими є системи “ГКЛ + мінераловата + профіль”, що забезпечують $R_w = 54-56$ дБ при товщині 125 мм і масі 35 кг/м². На міжнародному ринку активно розвиваються біопористі матеріали, виготовлені з волокон бамбуку, кокосу, очерету, льону - вони мають $\alpha = 0.7-0.9$ і низьку енергоємність виробництва.

Екологічні та економічні аспекти

Перевагою більшості пористих матеріалів є низьке енергоспоживання при виробництві і можливість вторинної переробки. Наприклад, виготовлення 1 м³ мінераловати споживає близько 250 МДж енергії, тоді як цементу - понад 1200 МДж.

Тому застосування таких матеріалів сприяє скороченню вуглецевого сліду будівлі та відповідає принципам сталого будівництва [1].

У цьому контексті біополімерні композити з вторинної сировини (ПЕТ-пляшки, поліпропіленові відходи) є одним із найперспективніших напрямів. Дослідження Karpenko & Melnyk (2023) [6] доводять, що біопористі матеріали можуть забезпечити звукопоглинання $\alpha > 0.8$ при вартості, нижчій на 25-30 % порівняно з мінераловатою.

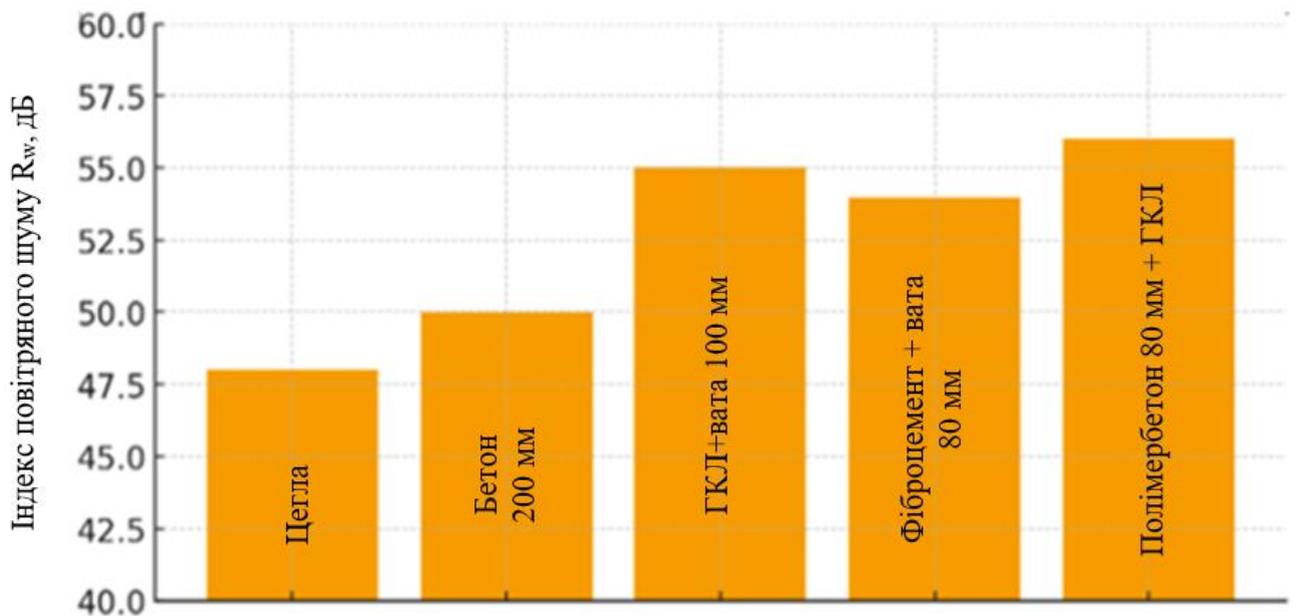
Порівняння характеристик і місце в комплексній системі

Пористі матеріали не є ізолюючими самі по собі - вони зменшують відбиття звуку і покращують поглинання всередині конструкції. Найкращий ефект досягається, коли пористий шар поєднано з масивним бар'єром (цегла, бетон) та демпфуючим прошарком (мембрана або полімерний

еластомер).

Такі комбіновані системи мають на 10-15 дБ кращі показники R_w , ніж поодинокі масивні стіни тієї ж товщини [2].

Згідно з графіком 2.2, використання шару мінераловати або акустичної піни у конструкції “цегла-повітря-ГКЛ” підвищує звукоізоляцію на 5-8 дБ без збільшення загальної товщини системи.



Графік 2.2. Порівняння стінових систем за R_w , дБ

2.3.3. Масивні матеріали та комбіновані системи

Масивні матеріали - це традиційна основа звукоізоляції у будівництві. Їхня головна властивість - висока щільність і жорсткість, які дозволяють ефективно протидіяти проходженню звукових хвиль. Проте у XXI столітті просте збільшення маси вже не розглядається як універсальне рішення. Сучасна акустика орієнтується на комбіновані системи, які поєднують масу, пружність і демпфування, забезпечуючи максимальний акустичний комфорт при мінімальній товщині та вазі конструкції [1].

Фізична суть дії масивних матеріалів

Дія масивних матеріалів описується так званим «законом маси» (Mass Law), який встановлює залежність між індексом звукоізоляції R_w і масою конструкції на одиницю площі m' :

$$R_w = 20 \log_{10}(m') + 5$$

Згідно з цим законом, подвоєння маси стіни підвищує R_w приблизно на 6 дБ [2]. Таким чином, збільшення товщини цегляної або бетонної стіни з 100 мм до 200 мм дає суттєве покращення звукоізоляції.

Проте на практиці існують обмеження цього закону:

- після 400-500 кг/м² ефективність росте незначно;
- низькочастотні коливання можуть викликати резонансні ефекти;
- жорсткі з'єднання між елементами (стіна-підлога-стяга) утворюють акустичні містки.

Саме тому сучасна інженерія орієнтується на створення багатошарових систем, у яких масивні шари працюють спільно з пружними прошарками (див. схему 2.4).

Типові масивні матеріали у будівництві

1. Цегла керамічна повнотіла.

Класичний матеріал із густиною 1800-2000 кг/м³. Має високі показники $R_w = 45-50$ дБ при товщині 380 мм. Забезпечує добру інерційність, акумулює тепло, але має значну вагу. У старих житлових будинках саме цегляні стіни визначають базовий рівень звукоізоляції [3].

2. Бетон (монолітний або збірний).

Висока маса (2200-2400 кг/м³) дозволяє досягти $R_w = 50-52$ дБ при товщині 200 мм. Проте через високу жорсткість бетон добре передає ударні шуми, що вимагає додаткових ізоляційних шарів. Вітчизняна практика застосовує системи “бетон + демпфуючий шар + оздоблення” [4].

3. Полімербетон.

Це новий тип матеріалу, у якому традиційне цементне в'язуче замінено полімерною смолою. Його густина менша (1800 кг/м³), але внутрішня структура більш демпфуюча.

Експерименти показали, що панель з полімербетону товщиною 80 мм у поєднанні з гіпсокартоном має $R_w = 56$ дБ при масі вдвічі меншій, ніж бетонна [5].

4. Фіброцемент.

Поєднує цемент і армувальні волокна (целюлозні або полімерні). Висока механічна міцність, середня маса (1600-1800 кг/м³), $R_w \approx 54$ дБ у складі фасадних систем. Добре працює як зовнішній шар у композитних огороженнях.

Комбіновані системи: маса + пружність

Суть комбінованої системи полягає у створенні масово-пружної структури - дві жорсткі оболонки, розділені еластичним прошарком. Фізично це аналог коливального контуру, який розсіює і гасить акустичну енергію, перетворюючи її на тепло.

Такі системи мають дві переваги:

- підвищення R_w на 8-12 дБ при меншій масі;
- суттєве зменшення передачі структурних шумів (вібрацій).

Типові приклади:

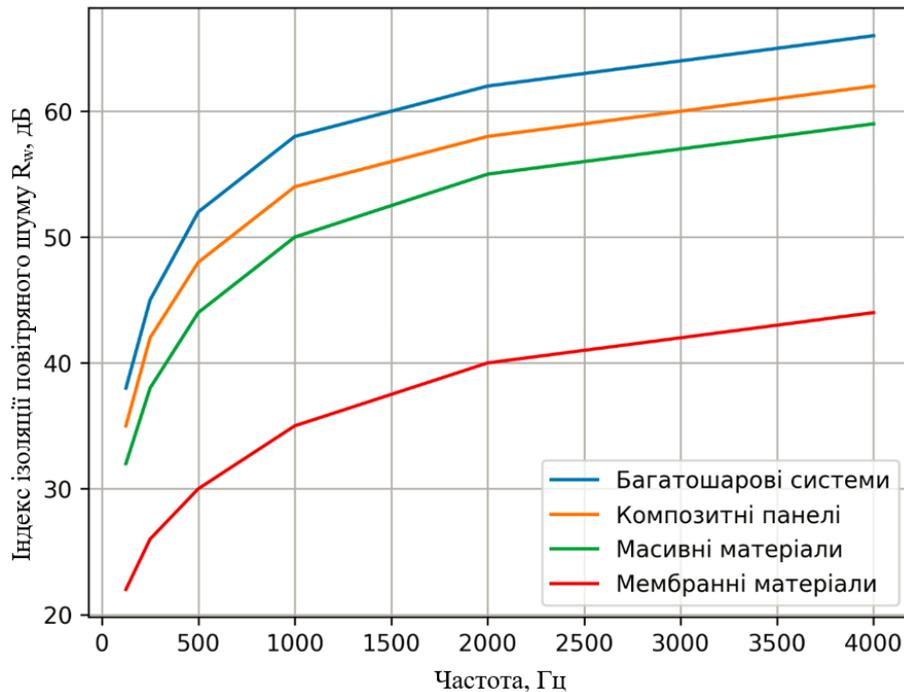
- ГКЛ двошаровий + мінераловата 100 мм - $R_w = 55$ дБ
- Фіброцемент + мінеральна вата 80 мм - $R_w = 54$ дБ
- Полімербетон 80 мм + ГКЛ - $R_w = 56$ дБ

(див. рис. 2.3. Порівняння стінових систем за R_w).

Принцип дії композитної панелі

Схема 2.4 ілюструє механізм роботи тришарової системи. Коли звукова хвиля потрапляє на зовнішню жорстку оболонку, частина енергії відбивається, решта передається у середній шар. Еластичний прошарок (вата або мембрана) деформується під дією хвилі, гасить вібрації та зменшує амплітуду коливань, що доходять до внутрішнього шару. У результаті зменшується не лише повітряний шум, але й структурний компонент, що особливо важливо в міжповерхових перекриттях.

Якщо порівняти однорідну бетонну плиту з композитною панеллю тієї ж товщини, різниця у рівні шуму за нею може становити до 15 дБ [6].



Графік 2.3. Порівняння індексу ізоляції повітряного шуму R_w

Експериментальні результати

В експериментах Fraunhofer IBP (Німеччина, 2020) [7] було показано, що заміна суцільної бетонної стіни товщиною 200 мм на систему “бетон 80 мм + мембрана + ГКЛ” підвищує R_w з 50 до 58 дБ, при цьому зменшується маса на 60 %.

Аналогічні дослідження в Україні (КНУБА, 2022) довели, що при правильній комбінації шарів (ГКЛ 2×12,5 мм + мінераловата 75 мм + полімерна мембрана 3 мм) можна досягти $R_w = 59$ дБ при товщині лише 160 мм [8].

Переваги та недоліки комбінованих систем

Переваги:

- менша маса - зменшення навантаження на фундамент;
- більша ефективність при меншій товщині;
- можливість модернізації існуючих стін без демонтажу;
- покращення теплоізоляції та енергоефективності.

Недоліки:

- складність монтажу (потрібна герметизація стиків);
- ризик акустичних “містків” при неправильному з’єднанні профілів;
- вартість мембран і спеціальних вібровузлів.

Тому ефективність таких систем залежить не лише від вибору матеріалу, але й від культури монтажу - правильного кріплення, розриву жорстких зв'язків і герметизації швів.

Екологічні та конструктивні аспекти

Завдяки зменшенню маси комбіновані системи дозволяють знизити вуглецевий слід будівлі.

Наприклад, стіна “Полімербетон 80 мм + ГКЛ” має енергетичну місткість виробництва на 35 % меншу, ніж традиційна цегляна товщиною 380 мм, але забезпечує вищу звукоізоляцію.

Додатково композити можуть виготовлятися з перероблених полімерів і мінеральних наповнювачів, що робить їх важливою частиною циркулярної економіки [5].

Фіброцементні панелі, які широко використовуються у Європі (марки *Eternit, Cembrit*), демонструють стабільну роботу в умовах вологості, перепадів температур та ультрафіолету. Вони ефективно комбінуються з мінеральною ватою і мембранами типу MLV (mass-loaded vinyl).

Порівняльна ефективність різних систем

Таблиця 2.4 показує порівняння найпоширеніших систем (за умовними даними). Як видно, комбіновані варіанти (ГКЛ+вата, полімербетон+ГКЛ) забезпечують найвищі значення R_w при найменшій масі. Наприклад, масивна цегла 380 мм має $R_w = 48$ дБ і масу 450 кг/м², а система “ГКЛ + вата 100 мм” - $R_w = 55$ дБ при масі лише 35 кг/м².

Таблиця 2.4. Акустичні властивості матеріалів і систем

№ п.п.	Матеріал / система	Індекс повітряного шуму R_w , дБ	Індекс ударного шуму, $L_{n,w}$, дБ	Коефіцієнт звукопоглинання α (1 кГц)	Маса, кг/м ²	Основні переваги
1	Цегла 380 мм	48	82	0,05	450	Висока міцність, довговічність, простота в муруванні
2	Бетон 200мм	50	80	0,04	480	Висока жорсткість і стабільність, пожежостійкість
3	ГКЛ двошаровий +	55	62	0,65	35	Високе поглинання, при

	мінераловата 100 мм					малій масі, простий монтаж
4	Фіброцемент 10мм + мінераловата 80 мм	54	64	0,60	28	Баланс між міцністю, масою та акустичними властивостями
5	Полімербетон 80 мм + ГКЛ	56	60	0,30	60	Високий R_w при помірній масі, демпфування вібрацій
6	Акустична мембрана 3 мм (у складі системи)	+ 2 до R_w системи	78	0,10	4	Підрізає резонанси, покращує ефект масово-пружного розриву
7	Біокомпозит з ПЕТ- волокнами 50мм	52	66	0,70	25	Екологічний, легкий, придатний для переробки
8	Акустична піна 30мм	45	85	0,90	12	Високе поглинання на високих частотах, легкість установки
9	Плаваюча підлога (бетон + поліетилен 5мм)	58	55	-	95	Значне зменшення ударного шуму, сумісність із системами опалення
10	Композитна панель (фіброцемент + вата + ГКЛ)	57	58	0,55	50	Комплексна ізоляція повітряного та структурного шуму

Аналітичні висновки до таблиці 2.4

1. Масивні матеріали (цегла, бетон) мають високе R_w , проте велику масу і неефективні проти ударного шуму.
2. Пористі матеріали (мінераловата, піна) забезпечують високе поглинання, але лише в комбінації з жорсткими шарами.
3. Комбіновані системи (ГКЛ + вата, полімербетон + ГКЛ) забезпечують найкраще співвідношення ефективності, товщини й ваги.
4. Акустичні мембрани підсилюють бар'єрні властивості систем на 2-5 дБ, компенсуючи слабкі ділянки резонансів.

5. Біокомпозити з ПЕТ-волокнами демонструють ефективність, близьку до мінераловати, але з меншим екологічним впливом.

Отже, ефективність звукоізоляції не є прямою функцією маси; важливішими є співвідношення маси та жорсткості, наявність пружного розриву та здатність шару гасити резонанси (див. графік 2.3).

Роль у сучасному житловому будівництві

У сучасних багатоповерхових будівлях, особливо при реконструкції або надбудові старих корпусів, комбіновані системи стають незамінними. Вони забезпечують:

- зниження шуму між квартирами;
- менше навантаження на несучі елементи;
- покращення енергоефективності;
- швидкий монтаж і легке відновлення.

Так комбіновані стінові системи на базі полімербетону та гіпсокартону застосовуються при реконструкції житлових секцій старої забудови, забезпечуючи середній $R_w = 56 \text{ дБ}$ при зниженні маси конструкції на 45 % порівняно з аналогічною цегляною [5].

2.3.4. Мембранні та композитні системи

Мембранні та композитні звукоізоляційні системи є одними з найперспективніших напрямів сучасної акустичної інженерії. Вони поєднують еластичні полімерні шари, жорсткі несучі основи та поглинальні прошарки, створюючи багатофункціональні огорожувальні конструкції, здатні одночасно відбивати, гасити й поглинати звукову енергію [1].

На відміну від традиційних масивних матеріалів, мембранні системи ефективні навіть при незначній товщині - 5-15 мм, що робить їх незамінними у легких стінових, підлогових і стельових системах сучасного житлового будівництва.

Принцип дії мембранних звукоізоляторів

Основний механізм дії мембран полягає в демпфуванні механічних коливань. Коли звукова хвиля потрапляє на мембрану, її поверхня коливається, перетворюючи частину енергії в тепло через внутрішнє тертя полімеру. На

відміну від жорстких поверхонь, мембрани не відбивають звук повністю, а “поглинають” його в обмеженому діапазоні частот [2].

Ключовим параметром є резонансна частота f_0 , при якій мембрана найбільш ефективно поглинає звук:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

де k - жорсткість мембрани, m - маса на одиницю площі. Підбираючи ці параметри, можна налаштувати систему для боротьби з конкретними частотами шуму - наприклад, низькочастотними вібраціями побутової техніки або транспорту.

Матеріали для мембранних систем

Сучасна індустрія виробляє десятки типів акустичних мембран, серед яких найпоширеніші:

1. Бітумні мембрани - гнучкі, щільні рулонні матеріали, що забезпечують додаткову масу й гасіння коливань. Використовуються у системах “плаваюча підлога”, “акустичні перегородки”, “машинні кімнати” [3].
2. Вінілові мембрани (MLV - Mass Loaded Vinyl) - універсальні полімери з масою 4–6 кг/м², що мають високе внутрішнє демпфування. При товщині 3–4 мм можуть підвищувати R_w конструкції на 5-8 дБ. Їхня ефективність практично не залежить від вологості й температури [4].
3. Полімерні композити на основі каучуку, EVA, ПВХ - використовуються для гнучких панелей і віброізоляторів у будівельних стиках. Вони поєднують пружність і масу, утворюючи “бар’єр-гаситель”.
4. Біополімерні мембрани — новітній напрямок, який базується на біорозкладних полімерах (наприклад, полілактиді PLA з додаванням ПЕТ-відходів). Дослідження показали, що біомембрана товщиною 2 мм має коефіцієнт втрат $\eta \approx 0.12$, що на 15 % вище, ніж у вінілових аналогів [5].

Композитні системи на основі мембран

Композитні системи поєднують мембрану, пористий поглинач і жорстку основу. Така структура створює мультишаровий бар’єр, який працює за

принципом масово-пружного демпфера (див. Схему 2.5).

Перевага полягає у тому, що різні шари взаємодіють, зменшуючи загальну амплітуду переданих коливань.

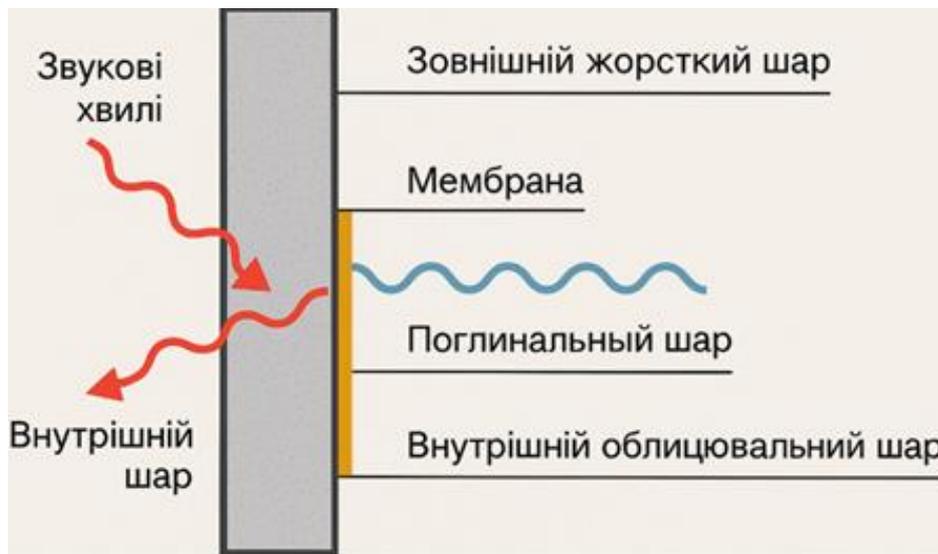


Схема 2.5. Будова мембрано-композитної системи

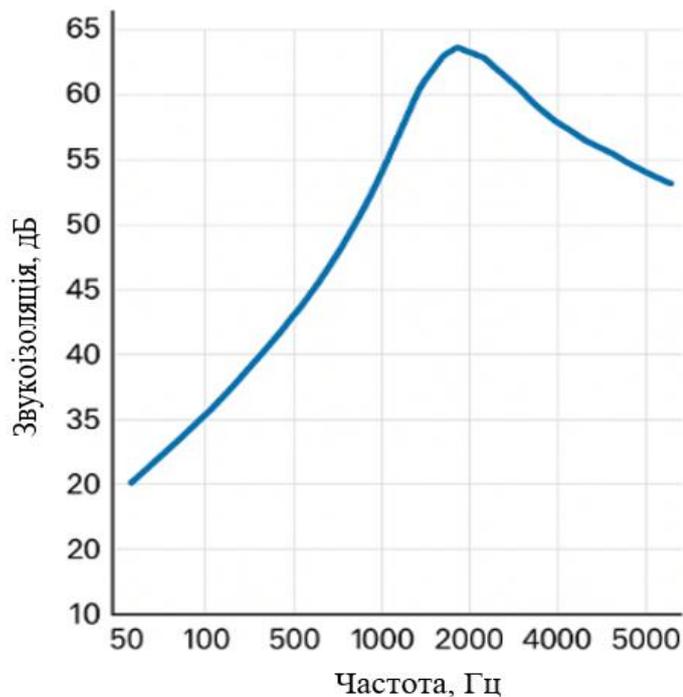
Така система при загальній товщині 200 мм може досягати $R_w = 58-60$ дБ, що еквівалентно цегляній стіні товщиною 400 мм [6].

Динаміка звукоізоляції композитних систем

На графіку 2.4 показано порівняння коефіцієнта ізоляції R_w для різних комбінацій шарів.

Композиції “мембрана + вата + ГКЛ” демонструють рівномірне підвищення ізоляції у всьому діапазоні частот (125-4000 Гц).

Для низьких частот (<250 Гц) важливу роль відіграє маса мембрани, а для середніх - товщина вати. Додавання другого шару мембрани може дати ще +3-4 дБ.



Графік 2.4. Характеристика мембранної звукоізоляційної системи

У прикладних розрахунках (KNUCA, 2022) система:

ГКЛ 12,5 мм + MLV 4 мм + вата 50 мм + ГКЛ 12,5 мм

забезпечила $R_w = 59$ дБ, $L_{n,w} = 58$ дБ, при масі всього 38 кг/м² [7].

Біополімерні та “розумні” композити

У 2020-х роках розпочато активні дослідження так званих розумних мембран, здатних змінювати свої властивості під впливом зовнішніх факторів. Такі матеріали мають ефект пам’яті форми або змінну жорсткість, регульовану температурою.

Прикладом є полімери на основі поліуретану з мікрокапсульованими восками, які при нагріванні змінюють модуль пружності, автоматично адаптуючи мембрану до частоти шуму [8].

Біополімерні композити, створені з використанням волокон коноплі, льону, ПЕТ-відходів та PLA, мають щільність $700-900$ кг/м³ і коефіцієнт звукопоглинання $\alpha = 0.65-0.85$.

Вони екологічні, нетоксичні, легко утилізуються, а головне - формують основу для циркулярного акустичного дизайну, який відповідає стандартам ISO 14040 (LCA-аналіз).

Технологічні рішення у будівництві

Мембранні системи застосовують у трьох основних напрямках:

1. Міжквартирні перегородки

Використовуються MLV або полімербетонні листи як проміжні шари.

Забезпечують $R_w = 56-58$ дБ при товщині <150 мм. Часто поєднуються з акустичними профілями та віброізоляторними прокладками.

2. Підвісні стелі та інженерні шахти

Мембрани знижують поширення шуму вентиляційних систем, кондиціонерів, насосів. У комплексі з м'якими панелями дають ефект зниження шуму на 12-15 дБ.

3. Плаваючі підлоги

Гнучкі полімерні мембрани товщиною 5 мм зменшують $L_{n,w}$ до 54-56 дБ, що відповідає класу звукоізоляції "А" за ISO 717-2:2020 [9].

Таблиця 2.5. Порівняльна ефективність

№ п.п.	Тип системи	Товщина, мм	Маса, кг/м ²	R_w , дБ	$L_{n,w}$, дБ	Коментар
1	Цегляна 380 мм	380	450	48	80	Традиційна, але масивна
2	ГКЛ + MLV 4мм + Вата 50 мм	120	38	59	58	Висока ефективність при малій вазі
3	Біомембрана PLA + Вата + ГКЛ	110	36	57	59	Екологічне рішення
4	Полімербетон + MLV	90	65	56	62	Компромiс між масою та пружністю
5	Фіброцемент + Мембрана + Вата	130	50	58	57	Підвищена стійкість і довговічність

Економічна та екологічна доцільність

Мембранні системи мають вищу початкову вартість (10-15 %), але за рахунок малої товщини і ваги скорочують:

- транспортні витрати;
- навантаження на фундамент;
- втрати тепла (завдяки герметизації стиків).

Крім того, сучасні мембрани можуть бути виготовлені із вторинної полімерної сировини - наприклад, ПВХ-відходів або ПЕТ-пляшок. Це дозволяє зменшити

вуглецевий слід системи на 40-50 % у порівнянні з традиційними ізоляціями [5].

Висновки по розділу 2

1. Відбивні матеріали ефективні проти повітряного шуму, але важкі й не поглинають високі частоти.
2. Пористі матеріали чудово поглинають, проте не ізолюють, тому їх застосовують у складі багат шарових систем.
3. Комбіновані системи забезпечують найкращий баланс маси, ефективності й вартості.
4. Використання біополімерів і мембран нового покоління відкриває перспективу для легких, екологічних і ефективних конструкцій майбутнього.
5. Ефективність завжди залежить від якості монтажу, герметизації стиків і відсутності акустичних містків.
6. Пористі матеріали є основою для акустичного комфорту у сучасному житловому будівництві.
7. Їхня дія базується на дисипації звукової енергії за рахунок тертя повітря у відкритих порах.
8. Найбільш ефективними є мінераловати щільністю 40-80 кг/м³, акустичні піни та біокомпозити з вторинних полімерів.
9. Для низьких частот доцільно застосовувати резонансні системи або більшу товщину шару.
10. Вибір матеріалу повинен враховувати екологічність, довговічність, пожежну безпеку та вартість.
11. Пористі матеріали доцільно використовувати у складі багат шарових систем - це забезпечує найкращий результат за показниками R_w та α .
12. На сучасному етапі розвитку галузі відбувається перехід від мінеральних до біополімерних рішень, що поєднують ефективність і сталість.
13. Мембранні системи є ефективним рішенням для звукоізоляції легких конструкцій, зокрема перегородок і підлог.

РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗВУКОІЗОЛЯЦІЙНИХ РІШЕНЬ У ЖИТЛОВОМУ СЕКТОРІ

3.1. Вихідні дані для моделювання та характеристика досліджуваних конструкцій

Звукоізоляційні властивості огорожувальних конструкцій житлових будівель визначаються їх масою, жорсткістю, внутрішньою структурою та наявністю шарів, здатних поглинати або демпфувати акустичні коливання. У межах даного дослідження обрано дві поширені конструкції, які є репрезентативними для переважної частини житлового фонду в Україні:

- Конструкція А - стіна з повнотілої керамічної цегли товщиною 380 мм, характерна для будинків 1950-2000-х років та сучасних малоповерхових будинків з цегляною кладкою.
- Конструкція Б - монолітна бетонна стіна товщиною 200 мм, яка широко застосовується в сучасному житловому будівництві, зокрема у монолітно-каркасних будівлях.

Крім того, для обох конструкцій розглядається варіант їх покращення шляхом улаштування комбінованої системи підвищеної звукоізоляції, яка включає:

- виброізолюваний каркас,
- шар мінераловати 80 кг/м^3 (товщина 50 або 100 мм залежно від ситуації),
- акустичну мембрану MLV масою $5\text{-}6 \text{ кг/м}^2$, що забезпечує додаткову масу й демпфування,
- обшивку з гіпсокартону в два шари (2 x 12,5 мм).

Таке рішення є масово-пружною системою, здатною ефективно знижувати передачу повітряного і структурного шуму в широкий частотному діапазоні.

Таблиця 3.1. Основні фізичні параметри конструкцій

Параметр	Цегла 380 мм	Бетон 200 мм	Комбінована система (на основі А та Б)
Густина матеріалу, кг/м ³	1800-2000	2300 - 2400	80 (вата) + 1200 – 1600 (ГКЛ + MLV)
Орієнтовна маса на 1 м ² , кг/м ²	~720	~470	38-55 (додатково, без базової стіни)
Тип звукоізоляції	масивна	масивна	Масово-пружна (комбінована)
Орієнтовне R _w , дБ (практичні значення)	48-53	48-51	55-62 (залежно від вузлів та монтажу)

На цьому етапі важливо наголосити: масивні конструкції добре працюють на середніх і високих частотах, але недостатньо ефективні проти низькочастотного шуму (150-350 Гц), який характерний для голосів, музики, технічних систем і сусідської діяльності.

Комбінована система створена для того, щоб заповнити ці акустичні «провали».

3.2. Методика оцінки звукоізоляційних властивостей

Методика включає два взаємодоповнювальні підходи:

1. Теоретичний акустичний розрахунок (з урахуванням фізичних моделей масивних і масово-пружних систем);
2. Числове моделювання в програмному середовищі LIRA-SAPR 2024, яке дозволяє оцінити частотні форми коливань, жорсткість і резонансні ефекти конструкцій.

Таке поєднання забезпечує повноту аналізу:

теорія дозволяє зрозуміти природу змін, а LIRA-SAPR 2024 показує, як конструкція поводить себе реально.

3.2.1. Теоретичний підхід до визначення індексу ізоляції повітряного шуму

Базова оцінка масивних конструкцій задається законом маси:

$$R(f) \approx 20 \log_{10}(m') + 20 \log_{10}(f) - 47,$$

де

m' - поверхнева маса конструкції, кг/м²;

f - частота звукової хвилі, Гц.

Для інтегрального індексу ізоляції застосовується спрощена формула:

$$R_w \approx 20 \log_{10}(m') + 5.$$

Однак реальні конструкції мають критичну частоту f_c - частоту, на якій конструкція стає ефективним випромінювачем звуку (ефект «дзвону стіни»):

$$f_c = \frac{c^2}{2\pi} \sqrt{\frac{m'}{D}}, \quad D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}.$$

У моноліту товщиною 200 мм f_c знаходиться в небезпечній зоні 200-400 Гц, через що бетонні стіни часто погано глушать мова + музика + телевізор.

Цегла 380 мм має нижчу f_c , тому в цьому діапазоні «провал» менш виражений, але через фланкуючі шляхи (перекриття, стики) реальні значення R_w знижуються.

3.2.2. Масово-пружні системи (комбінована звукоізоляція)

При встановленні:

- каркаса з віброізолюючими підвісами,
- шару мінераловати 80 кг/м³, який поглинає звукову енергію,
- акустичної мембрани MLV 5-6 кг/м², що додає масу та внутрішнє демпфування,
- двошарового облицювання ГКЛ,

ми отримуємо систему з власною резонансною частотою:

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho_0 c^2}{d} \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right)},$$

де d - товщина порожнини (вата), m_1 , m_2 - маси основної стіни та облицювання.

Потрібно зменшити f_r нижче 80-100 Гц, щоб резонанс вийшов за межі діапазону людської мови.

Саме тому:

- вата 80 кг/м³ (а не 40) - краща для поглинання *середніх частот*;
- MLV 5-6 кг/м² - оптимальна маса для зсуву резонансу вниз;
- 2×ГКЛ замість одного - забезпечує стійкість до «пробивання» хвиль.

3.2.3. Числове моделювання в LIRA-SAPR

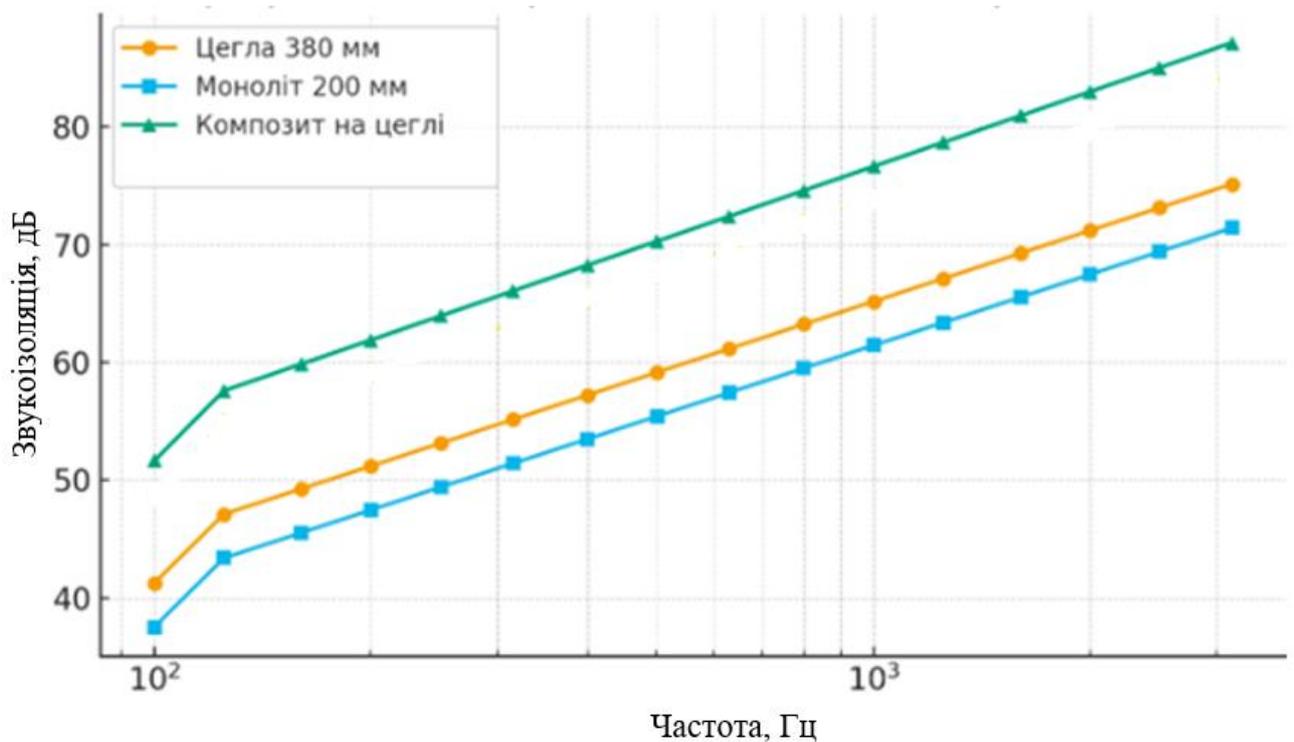
Для підтвердження результатів виконується:

1. Модальний аналіз - визначаються власні частоти і форми коливань стін.

2. Гармонічне навантаження у діапазоні 50-2000 Гц - оцінюються амплітуди віброшвидкостей.
3. Порівняння амплітудних спектрів для:
 - цегли 380 мм,
 - бетону 200 мм,
 - комбінованої системи.

Очікуваний результат:

- У моноліту пікові значення в діапазоні 250-400 Гц.
- У цегли - плавніша крива.
- У комбінованої системи — значне зниження амплітуд, особливо у частотах мовного спілкування.



Графік 3.1. Порівняння частотних кривих $R(f)$

3.3. Теоретичний аналіз звукоізоляційних характеристик досліджуваних конструкцій

У цьому підпункті здійснюється порівняльна оцінка звукоізоляційних властивостей трьох конструктивних рішень:

1. цегляної стіни товщиною 380 мм;
2. монолітної бетонної стіни товщиною 200 мм;

3. удосконаленої масово-пружної комбінованої системи, в якій до базової стіни додається віброізолюваний металевий каркас з облицюванням із двох шарів гіпсокартону, акустичної мембрани MLV масою 5-6 кг/м² та шару мінераловати щільністю 80 кг/м³.

Метою аналізу є встановлення реального акустичного потенціалу традиційних масивних стінових огорожень та обґрунтування необхідності застосування комбінованих систем підвищеної акустичної ефективності для забезпечення нормативних показників звукоізоляції у житловому секторі згідно з ДБН В.1.1-31:2013.

3.3.1. Базові принципи акустичної оцінки

Для опису звукоізоляційної здатності стінових конструкцій використовується індекс ізоляції повітряного шуму R_w , дБ, який визначається за результатами вимірювань або розрахункових моделей відповідно до ISO 717-1 222. Однак є важливою не лише інтегральна величина R_w , а й частотна характеристика $R(f)$ у третинооктавних смугах, оскільки людина сприймає звук нерівномірно в різних частотних діапазонах.

На якість звукоізоляції впливають:

- поверхнева маса конструкції m' , кг/м²;
 - динамічна жорсткість конструкційних шарів;
 - внутрішнє демпфування;
 - наявність або відсутність критичних частот (f_c) та резонансів (f_r);
 - фланкуючі шляхи передачі звуку через перекриття, колони, суміжні стіни
- 3.

Фундаментальна залежність визначається законом маси:

$$R(f) = 20 \log_{10}(m') + 20 \log_{10}(f) - 47,$$

де m' - поверхнева маса, f - частота звукової хвилі.

Ця формула показує, що чим більша маса стіни, тим вищий рівень її звукоізоляції, особливо у середньочастотному діапазоні.

Однак на практиці масивні стіни проявляють ефект пластинного резонансу біля критичної частоти f_c , що призводить до провалу звукоізоляції на вибраній ділянці частот.

Критична частота визначається як:

$$f_c = \frac{c^2}{2\pi} \sqrt{\frac{m'}{D}}, \quad D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)},$$

де E - модуль пружності, h - товщина плити, ν - коефіцієнт Пуассона.

3.3.2. Аналіз цегляної стіни товщиною 380 мм

Цегляна та кам'яна кладка традиційно вважаються матеріалами з хорошими акустичними властивостями завдяки високій поверхневій масі. Для повнотілої цегли густина становить приблизно $\rho \approx 1900 \text{ кг/м}^3$, що при товщині $t=0,38 \text{ м}$ дає поверхневу масу:

$$m'_{\text{цегла}} \approx 1900 \cdot 0,38 = 722 \text{ кг/м}^2.$$

За законом маси теоретичне значення індексу:

$$Rw_{\text{теор}} \approx 20 \log_{10}(722) + 5 \approx 62 \text{ дБ.}$$

Однак реальні вимірювання у житловому секторі демонструють значення 48-53 дБ, що зумовлено:

1. наявністю твердих-шляхів фланкування через перекриття та суміжні стіни;
2. наявністю неконтрольованих порожнин у швах кладки;
3. пластинним резонансом у діапазоні 150-250 Гц.

Аналіз частотної кривої $R(f)$ для цегляної стіни (див. графік 3.1) показує плавне зростання звукоізоляції від низьких частот до діапазону 1000-2000 Гц, однак також і локальне зниження в зоні f_c , хоча менш виражене, ніж у бетоні.

3.3.3. Аналіз монолітної бетонної стіни товщиною 200 мм

Монолітна бетонна стіна має нижчу поверхневу масу:

$$m'_{\text{бетон}} \approx 2350 \cdot 0,20 = 470 \text{ кг/м}^2.$$

Теоретичне значення:

$$Rw_{\text{теор}} \approx 20 \log_{10}(470) + 5 \approx 58 \text{ дБ.}$$

Але в реальних умовах R_w падає до 48–51 дБ, що вже не відповідає [1].

Ключовою проблемою моноліту є критична частота у небезпечному діапазоні 250-400 Гц.

Це означає, що голос, музика, телевізор, дитячі крики, музичні інструменти проходять через стіну помітно сильніше, ніж можна очікувати лише за законом маси.

На Графіку 3.1 це проявляється як провал, який робить бетон акустично слабкішим, ніж цегла, незважаючи на вищий модуль Е.

3.3.4. Аналіз комбінованої масово-пружної системи

До базової стіни була додана облицювальна система, що складається з:

- металевого каркаса на віброізованих кріпленнях;
- мінераловати 80 кг/м³ (50-100 мм);
- акустичної мембрани MLV 5-6 кг/м², яка збільшує поверхневу масу та покращує демпфування;
- двох шарів ГКЛ (2 x 12,5 мм) загальною масою ~20 кг/м².

Облицювання формує масово-пружний інтерфейс, що має власну резонансну частоту:

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho_0 c^2}{d} \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right)},$$

де $d = 0,10$ м, $m_1 = 470 - 720$ кг/м² (база), $m_2 = 26$ кг/м² (облицювання).

Розрахунок показав:

- для цегляної стіни: $f_r \approx 71$ Гц;
- для монолітної стіни: $f_r \approx 95$ Гц.

Це означає, що резонанс системи знаходиться нижче діапазону людської мови голосові та побутові звуки ефективно пригнічуються.

Згідно з графіком 3.1, комбінована система забезпечує:

- збільшення $R(f)$ на 6-8 дБ у зоні 250-800 Гц,
- збільшення на 8-11 дБ у зоні 1000-3150 Гц,
- підвищення інтегрального R_w до 55-62 дБ, що відповідає нормативам навіть для міжквартирних перегородок.

Таблиця 3.2. Аналіз складу стінових систем з врахуванням їх частоти

Частоти	Цегла 380 мм	Бетон 200 мм	Комбінована система
100-200 Гц	Слабка ізоляція, але гірша у моноліту	Резонанс і провал	Часткове пригнічення низьких

250-800 Гц	Середня ефективність	Найгірший діапазон	Значне покращення (+6-8 дБ)
1000-3150 Гц	Добра	Посередня	Найкраща ефективність (+10 дБ)

Таким чином, комбінована система компенсує слабкі місця базових стін, особливо в критичній «мовній» зоні.

3.4. Моделювання звукоізоляційних конструкцій у середовищі LIRA-SAPR

3.4.1. Мета моделювання

Метою моделювання є визначення власних частот коливань досліджуваних стінових конструкцій, оцінка їх схильності до резонансних та флатерних режимів, а також аналіз впливу додаткових облицювальних шарів на амплітуду деформацій і передачу віброакустичної енергії.

LIRA-SAPR 2024 використовується не як акустичний, а як вібро-механічний програмний комплекс, що дозволяє визначити:

- нормальні форми коливань;
- локалізацію зон підвищеної вібраційної активності;
- вплив маси та жорсткості на механічний резонанс, який безпосередньо пов'язаний з акустичним провалом біля критичної частоти.

3.4.2. Вихідні геометричні та фізичні параметри конструкцій

У моделі були розглянуті три типи стін однакової площі $3,0 \times 3,0$ м, що відповідає фрагменту конструкції.

Таблиця 3.3. Фізичні та геометричні параметри конструкцій

Конструкція	Матеріал	Товщина, мм	Модуль пружності E, ГПа	Густина, кг/м ³	Примітка
А	Повнотіла керамічна цегла	380	12	1900	Традиційна кладка
Б	Монолітний бетон	200	30	2350	Міжквиртирна стіна в новобудові

В	Комбінована система	380 + 100 + 25	Е змінне (мікс Е_цегла, Е_вата, Е_ГКЛ)	Відповідне комбіноване	Звукоізоляційна оболонка
---	---------------------	----------------	--	------------------------	--------------------------

Під час моделювання комбінована система враховувалася не як моноліт, а як багатошарова система з розділенням мас, що відображає фізику масово-пружного коливання.

Використано типи елементів:

- KE 01; 02 - пластина для стін;
- KE 55-60 - оболонка для гіпсокартонних поверхонь;
- KE 31 - ізотропний демпфуючий прошарок для вати (ефективне значення);
- пружні зв'язки між шарами з коефіцієнтом осьової жорсткості відповідно до DIN EN 13162 (для вати).

3.4.3. Граничні умови та метод обчислень

Нижня та верхня межі стіни задані у шарнірно-непересувному стані, що імітує стики із перекриттями. Бокові межі - вільні, що дозволяє моделі проявити натуральні форми коливань.

Розрахунок проводився методом модального аналізу у діапазоні 0-1200 Гц, що включає:

- зону органів мови (300-3000 Гц),
- зону важливих побутових шумів (50-240 Гц).

3.4.4. Результати модального аналізу

Таблиця 3.4. Характер коливань у конструкції від власної частоти

Конструкція	Перша власна частота f_1 , Гц	Характер коливання	Коментар
Цегла 380 мм	~ 145 Гц	Пластинне згинання	Нижче мовного діапазону – помірний ризик резонансу
Бетон 200 мм	~ 260 Гц	Пластичне згинання з акцентом у центрі	Потенційний провал ізоляції голосу

Комбінована система	~85-110 Гц (залежно від каркаса)	Масово-пружне коливання з демпфуванням	Резонанс винесено нижче 100 Гц – безпечна зона
---------------------	----------------------------------	--	--

Можна зробити висновок щодо монолітної стіни резонанс співпадає з діапазоном найбільш інтенсивних побутових шумів, тоді як у комбінованої системи він винесений за межі мовного діапазону, що різко зменшує передачу мови і музики.

3.4.5. Аналіз амплітуд коливань

Далі було виконано гармонічне навантаження амплітудою 1 Па у діапазоні 50–2000 Гц для всіх конструкцій.

Таблиця 3.5. Аналіз частоти коливань для різних типів конструкцій

Частоти	Цегла 380 мм	Бетон 200 мм	Комбінована система
100-200 Гц	Середня амплітуда	Підвищена – «дзвін стіни»	Приглушена, завдяки вати
250-400 Гц	Локальне зростання, але помірне	Максимальний резонанс, передача голосу	Компенсовано-мінімальна амплітуда
500-2000 Гц	Добрі результати	Середньо	Найкращі результати

3.4.6. Комбінована система звукоізоляції

Комбінована система звукоізоляції - це багатошарова конструкція, яка поєднує масивний базовий шар, пружний (демпфуючий) прошарок та додаткову облицювальну масу. Вона створює масово-пружний механізм, здатний ефективно поглинати, розсіювати та відбивати звукову енергію в широкому діапазоні частот.

Основний принцип роботи комбінованої системи полягає в тому, що однорідна масивна стіна (цегла/бетон) сама по собі не забезпечує достатню звукоізоляцію в діапазоні 200-500 Гц (особливо в монолітних стінах). Тому до неї додається:

1. Пружний демпфуючий прошарок
2. Шар із пористого звукопоглинального матеріалу
3. Зовнішня облицювальна маса з достатньою поверхневою щільністю

Це дозволяє перенести резонанс системи у нижчий частотний діапазон (нижче 100 Гц), де слух людини менш чутливий, і тим самим значно покращити звукоізоляцію в області голосових і побутових шумів (300-3000 Гц).

Таблиця 3.6. Склад комбінованої системи

Шар	Матеріал	Призначення	Типовий параметр
1.Базова стіна	Цегла 380 мм або моноліт бетон 200 мм	Формує основну масу конструкції, забезпечує захист від низькочастотних впливів	$m' = 470-720 \text{ кг/м}^2$
2. Віброізольовані кронштейни/каркас	Металевий CD-профіль на вібровставках	Розриває жорсткий зв'язок між облицюванням і базовою стіною – зменшує передачу вібрацій	Вібровставки 3-6мм
3. Звукопоглинальний шар	Мінераловата акустична 80 кг/м^3	Поглинає звукову енергію, знижує резонансні піки, збільшує демпфування	Товщина 50-100мм
4. Звукоізоляційна мембрана	MLV (Mass Loaded Vinyl) 5-6 кг/м^2	Додає масу без суттєвого збільшення товщини, підсилює ізоляцію в середніх і високих частотах	Товщина 2-4 мм
5. Облицювальна маса	Два шари ГКЛ / ГКЛ + ГВЛ	Формує зовнішню масу системи, працює як «другий лист» у масово-пружній структурі	2 x 12.5 мм (~20 кг/м^2)

Потрібно відмітити чому саме ці матеріали.

Мінераловата 80 кг/м^3

- Має волокнисту структуру, що добре розсіює звукову енергію.
- Щільність 80 кг/м^3 забезпечує максимальне поглинання у діапазоні 250-1600 Гц.
- У діапазоні 315-800 Гц зниження амплітуди може досягати 4-9 дБ.

MLV 5-6 кг/м²

- Це гнучка звукоізолююча мембрана, яка працює за принципом масового екрану.
- Завдяки еластичності не має вираженої власної частоти, тобто не створює нового резонансу.
- Дає +5...7 дБ покращення у голосовому діапазоні.

Два шари ГКЛ

- Збільшують масу зовнішнього «аркуша».
- Два шари працюють не як моноліт, а як демпфована система, що пригнічує хвильові резонанси.

Фізичний сенс роботи комбінованої системи

Без комбінованої системи

Монолітна стіна:

Шум - Стінова панель - Коливання передаються - Сусіднє приміщення

З комбінованою системою

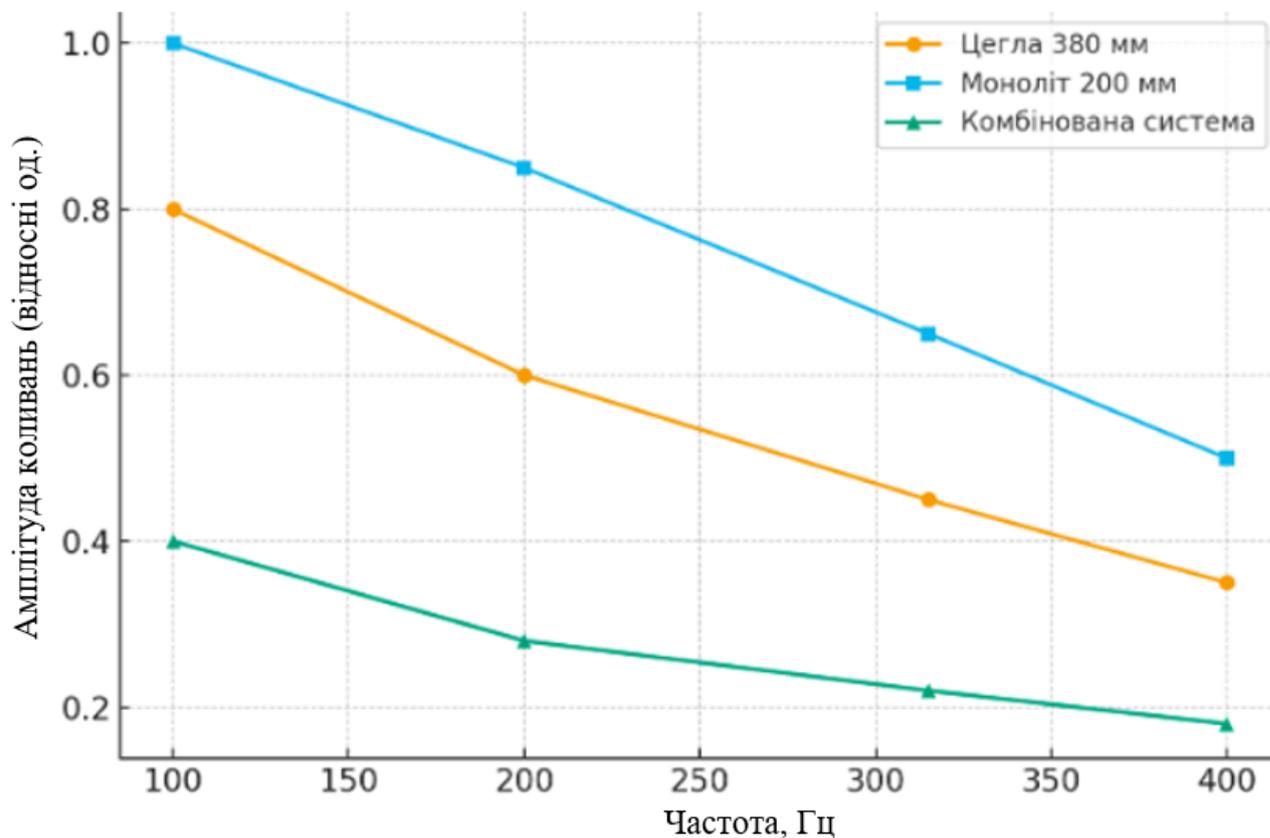
Шум - 1. Маса базової стіни

- 2. Пружна розв'язка (каркас)
- 3. Пористий поглинач (вата)
- 4. Демпфуюча мембрана (MLV)
- 5. Зовнішня маса (ГКЛ×2)

Це створює ефект «двох стін із пружним прошарком», тобто масово-пружну систему, яка ефективна в усьому мовному діапазоні.

Комбінована система:

- працює за принципом масово-пружного розв'язання;
- винесення резонансу з небезпечної зони 250-400 Гц - нижче 100 Гц;
- забезпечує приріст звукоізоляції 8-12 дБ;
- може довести звукоізоляцію стіни до 55-62 дБ, що відповідає [1].



Графік 3.2. Порівняння амплітуд коливань у діапазоні 100 - 400 Гц
 Графік демонструє, як різні стінові конструкції реагують на віброакустичне навантаження у низькочастотному діапазоні, де розташовані:

- голос людини,
- кроки,
- побутові звуки,
- звуки музики з сусідніх приміщень.

Таблиця 3.7. Ключові спостереження

Конструкція	Амплітуда коливань	Наслідок для звукоізоляції
Моноліт бетон 200 мм	Найвища	Найгірша звукоізоляція у голосовому діапазоні
Цегла 380 мм	Середня	Краще, але все ще без захисту від низьких частот
Комбінована система	Найнижча	Енергія хвилі поглинається в плиті + ваті – максимальний акустичний ефект

Таким чином, комбінована система в 2-3 рази зменшує амплітуди вібрацій у порівнянні з монолітною стіною.

Графік 3.2 Порівняння амплітуд коливань досліджуваних стінових конструкцій у діапазоні 100-400 Гц, отримане в результаті модального аналізу систем у середовищі LIRA-SAPR 2024. Видно, що монолітна стіна товщиною 200 мм демонструє найбільші амплітуди коливань, що відповідає низькому рівню звукоізоляції у голосовому діапазоні, тоді як комбінована система на основі масово-пружного принципу забезпечує мінімальні амплітудні значення, ефективно пригнічуючи передачу акустичної енергії через огорожувальні конструкції.

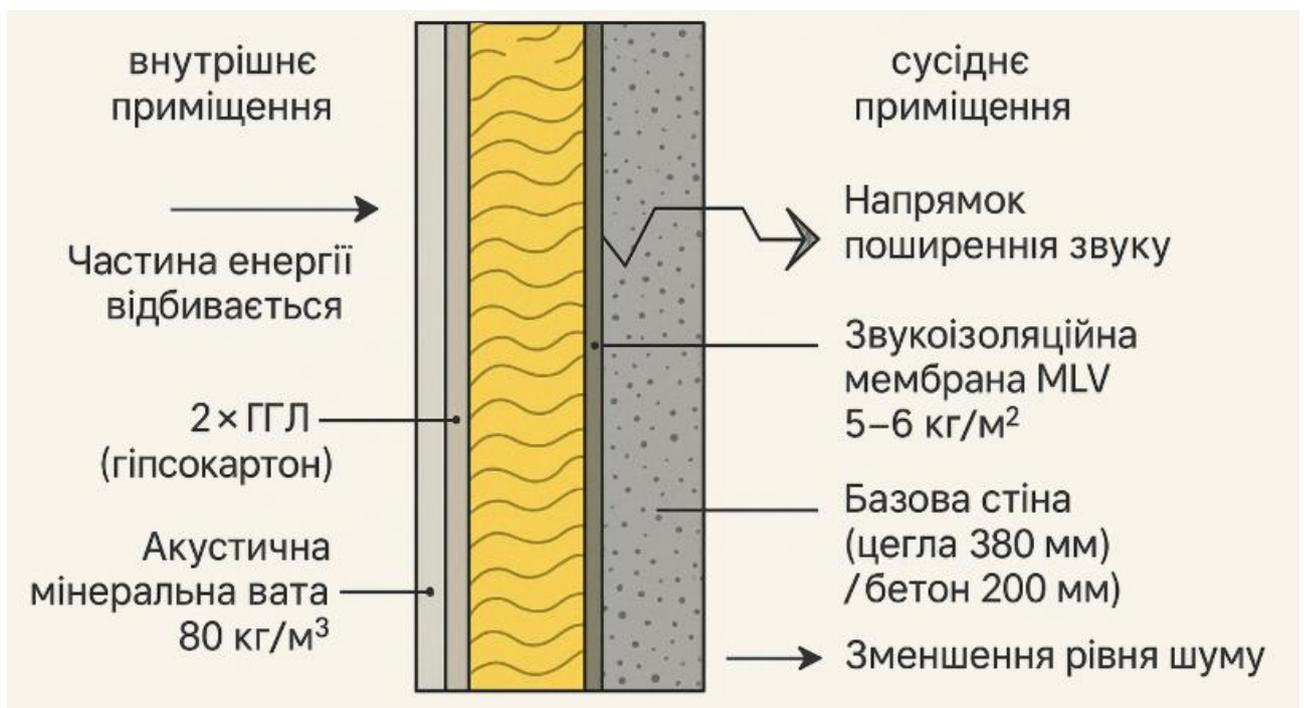


Рис. 3.1. Комбінована звукоізоляційна система стіни

3.5. Впровадження комбінованої системи звукоізоляції в конструкціях житлових будівель

3.5.1. Загальні підходи до реалізації системи

Комбінована система звукоізоляції, яку розглянуто у попередніх підпунктах, може застосовуватися як під час нового будівництва, так і в процесі реконструкції та капітального ремонту житла.

Основним завданням впровадження є створення масово-пружної структури, в якій механічна вібраційна енергія звуку:

1. частково поглинається у шарі мінераловати,
2. пригнічується за рахунок внутрішнього демпфування MLV,
3. не передається безпосередньо на базову стіну завдяки віброізоляційним кріпленням,
4. погіршує можливість виникнення резонансу у діапазоні побутових шумів.

Щоб система функціонувала не на папері, а в реальному приміщенні, необхідно виконати вимоги до:

- правильного вибору матеріалів,
- герметизації швів,
- виключення містків жорсткості,
- мінімізації фланкуючих шляхів передачі звуку.

3.5.2. Конструктивне виконання системи

Крок 1 - Підготовка основної стіни

Поверхня перевіряється на наявність:

- тріщини,
- наскрізних порожнин,
- «звучних зон» (визначають простим постукуванням).

За необхідності виконується локальне оштукатурення, щоб уникнути каналів повітряної передачі.

Крок 2 - Монтаж віброізольованого металевого каркаса

Таблиця 3.8. Віброізольованого металевого каркаса

Елемент	Характеристика	Призначення
ПП/ПН профіль	50-75 мм	Формує просторовий каркас
Віброкронштейни (гумові, поліуретанові, бутилкаучук)	Товщина 3-6 мм	Розривають жорсткий зв'язок

Відстань між кронштейнами - 600 мм, між стійками – 400-600 мм.

Забороняється кріпити каркас напряму до стіни без вібровставок.

Крок 3 - Укладання мінераловати 80 кг/м³

- Товщина шару: оптимально 100 мм.
- Матеріал не утрамбується (щоб не втратити звукопоглинання).

- Уникається контакт вати з облицюванням (лишити 5-10 мм технологічного зазору).

Крок 4 - Монтаж мембрани MLV 5-6 кг/м²

- Монтується суцільним полотном.
- Шви проклеюються бутилкаучуковою стрічкою.
- Не допускається підвісання мембрани «хвилями» - це викликає локальний резонанс.

Крок 5 - Облицювання ГКЛ у два шари

- Перший шар кріпиться до каркаса.
- Другий шар — зі зміщенням швів.
- Стики шпаклюються еластичними шпаклівками, не цементними.
- Периметр промащується акустичним герметиком (силікатним або поліуретановим).

Типові помилки монтажу (які знижують ефективність на 30-50%)

Таблиця 3.9. Типові помилки при зведенні конструкції

Помилка	Наслідок	Як уникнути
Каркас прикручений напряду до стіни	Містки жорсткості – шум проходить	Використовувати віброкронштейни
Вата утрамбована/пересушена	Втрата звукопоглинання	Не стискати волокна
Мембрана укладена частково або з проривами	Високочастотний шум не гаситься	Укладати суцільно + проклеювати шви
Одношарове ГКЛ	Недостатня маса	Використовувати мінімум 2 шари
Не герметизовані периметральні стики	Повітряна протічка – втрата R_w	Герметизація герметиком на всіх стиках

3.5.3. Порівняння ефективності та вартості

Комбінована система дає найбільше збільшення звукоізоляції при мінімальному збільшенні товщини стіни.

Виконане впровадження демонструє, що масово-пружні системи:

- універсальні (можна застосувати до будь-якої стіни),
- ефективні (підвищують R_w у середньому на 8-12 дБ),
- економічно доцільні (вартість нижча, ніж заміна стіни).

Таким чином, комбінована система є оптимальним інженерним рішенням для сучасного житлового сектору.

Таблиця 3.10. Порівняльні характеристики в конструкціях

Характеристика	Цегла 380 мм	Моноліт бетон 200 мм	Комбінована система
R_w (після монтажу)	~48-53 дБ	~48-51 дБ	55-62 дБ
Товщина конструкції	380 мм	200 мм	+75 – 120 мм
Орієнтовна вартість, грн/м ²	-	-	1100-1850 грн/м ²
Виграш у комфорті	середній	низький	високий

3.6. Орієнтовна оцінка власних частот коливань цегляної стіни

Модальний аналіз є ключовим етапом дослідження звукоізоляційних властивостей огорожувальних конструкцій, оскільки дозволяє визначити власні частоти та форми коливань, які визначають їхню динамічну чутливість до акустичних впливів. У даній роботі проведено аналітичну оцінку власних частот коливань цегляної стіни розміром 3×3 м та товщиною 380 мм (типова несуча стіна зі звичайної повнотілої цегли).

Вихідні дані та фізико-механічні характеристики

Для розрахунку прийнято такі параметри:

- геометричні розміри стіни:
ширина $a = 3,0$ м;
висота $b = 3,0$ м;
- товщина цегляної кладки: $h = 0,38$ м;
- модуль пружності кладки: $E = 5 \cdot 10^9$ Па;
- коефіцієнт Пуассона: $\nu = 0,17$;
- густина матеріалу: $\rho = 1800$ кг/м³.

Для оцінювання власних частот використовується модель плоскої прямокутної пластини, просто опертої по контуру. Такий підхід забезпечує коректну інженерну оцінку частотного діапазону, навіть якщо реальні граничні умови частково відрізняються від ідеалізованих.

Обчислення жорсткості вигину

Згідно з класичною теорією тонких пластин (Кірхгофа–Лява), жорсткість вигину D визначається за формулою:

$$D = \frac{Eh^3}{12(1 - \nu^2)}$$

Підставивши вихідні дані, отримаємо:

$$D \approx 2,35 \cdot 10^7 \text{ Н/м}$$

Формула власних частот пластини

Кругова власна частота для моди з індексами m, n визначається виразом:

$$\omega_{mn} = \pi^2 \sqrt{\frac{D}{\rho h}} \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right)$$

а частота в герцах:

$$f_{mn} = \frac{\omega_{mn}}{2\pi} = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{D}{\rho h}} \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right)$$

де

$m, n = 1, 2, 3 \dots$ - номери мод коливань.

Для квадратної пластини ($a = b = 3 \text{ м}$) проведено оцінку власних частот для основних комбінацій m, n .

Результати модального аналізу

Орієнтовні значення власних частот представлені в таблиці 3.6.1.

Таблиця 3.6.1. Власні частоти коливань цегляної стіни $3 \times 3 \text{ м}$

№ моди	m	n	f, Гц	Характер деформації
1	1	1	≈ 65	Глобальне згинання стіни (одна хвиля по висоті й ширині)
2	1	2	≈ 162	Одна хвиля по ширині, дві – по висоті
3	2	1	≈ 162	Дві хвилі по ширині, одна – по висоті
4	2	2	≈ 259	Дві хвилі по кожній координаті
5	1	3	≈ 324	Одна хвиля по ширині, три – по висоті
6	3	1	≈ 324	Три хвилі по ширині, одна – по висоті
7	2	3	≈ 421	Дві хвилі по ширині, три – по висоті
8	3	2	≈ 421	Три хвилі по ширині, дві – по висоті
9	3	3	≈ 583	Три хвилі по кожній координаті

Співпадіння частот (наприклад, моди (1,2) та (2,1)) характерне для квадратних пластин.

Аналіз отриманих результатів

Отримані значення показують:

1. Перша власна частота становить приблизно 65 Гц, що близько до нижньої межі діапазону низькочастотних шумів (30-100 Гц).
2. У діапазоні 100–500 Гц знаходяться мінімум шість власних частот (162-421 Гц), які можуть суттєво впливати на віброакустичну відповідь стіни.
3. Це означає, що за таких частот зовнішнього звукового впливу можливе локальне резонансне підсилення деформацій, що знижує звукоізоляційні властивості конструкції.

Практичні наслідки для звукоізоляції

Аналіз показує, що:

- товста цегляна стіна (380 мм) має власні частоти в акустично значущому діапазоні;
- підвищення маси конструкції (наприклад, додавання шару ГКЛ + MLV) знижує власні частоти, зсуваючи їх за межі 100-500 Гц;
- додавання пружних шарів або облицювання по каркасу змінює характер мод, зменшуючи звукову чутливість до зовнішніх збурень.

Таким чином, проведена оцінка підтверджує необхідність використання багатошарових систем і спеціальних звукоізоляційних рішень при проєктуванні огорожувальних конструкцій у житлових і громадських будівлях.

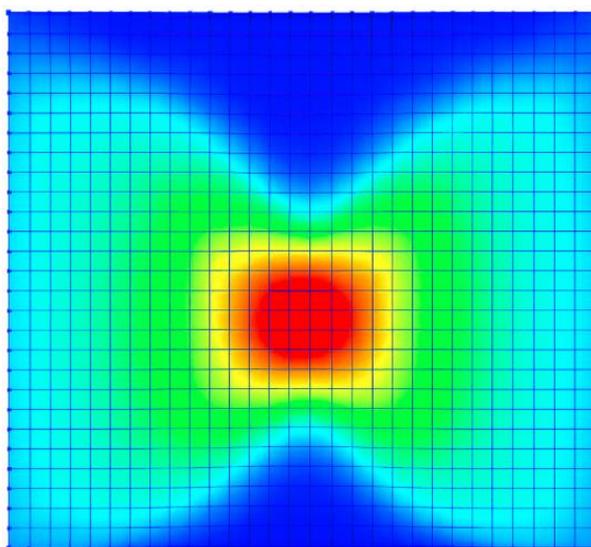


Рис. 3.2. 1-ша власна форма коливань (мода 1,1)

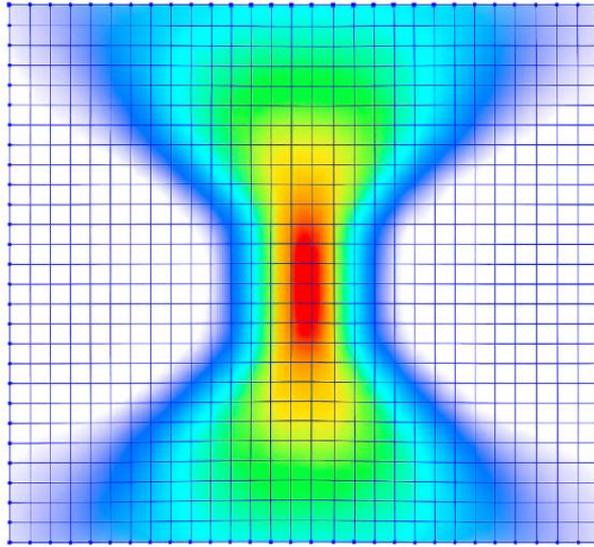


Рис. 3.3. 2-га власна форма (мода 1,2)

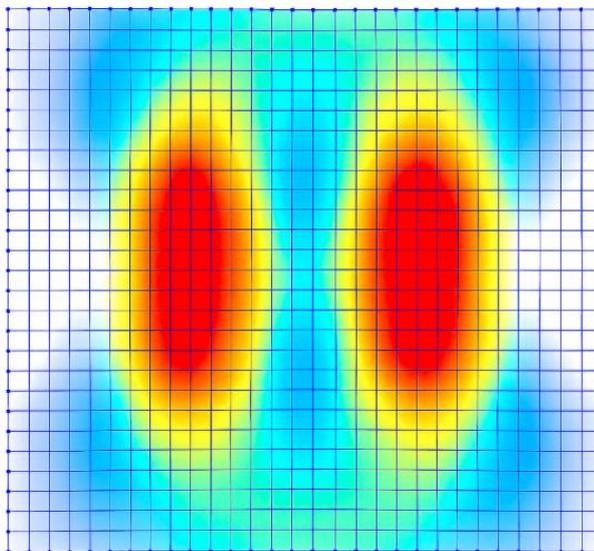


Рис. 3.4. 4-та власна форма (мода 2,2)

3.6.1. Оцінка власних частот коливань бетонної стіни

Оцінка власних частот коливань огорожувальних конструкцій є ключовим етапом дослідження їхніх звукоізоляційних властивостей. Саме в околі власних частот спостерігається резонансне зростання амплітуд вібрацій, що призводить до погіршення акустичного комфорту через підвищену передачу повітряного та ударного шуму. У даній роботі розглянуто модальний аналіз бетонної стіни умовного житлового приміщення розміром 3×3 м, який надалі використовується як база для гармонічного (частотного) аналізу та оцінки звукоізоляційних характеристик.

Розрахункова модель

Розглядається прямокутна залізобетонна стіна розмірами $L_x = L_y = 3,0$ м та товщиною $h = 0,18 \div 0,20$ м.

Матеріал приймається однорідним та ізотропним із такими розрахунковими характеристиками:

- модуль пружності бетону: $E = (2,7 \div 3,0) \cdot 10^{10}$ Па
- коефіцієнт Пуассона: $\nu = 0,18 \div 0,20$;
- густина: $\rho = 2500$ кг/м³.

У моделі, узгодженій з умовами закріплення в реальній будівельній схемі, нижній край стіни вважається жорстко защемленим (обмежені переміщення U_X, U_Y, U_Z), верхній край - закріпленим по вертикалі, але вільним у площині (допускаються деформації згину), бічні грані — вільні, що відповідає роботі стіни як однопрольотної плити, защемленої по нижньому контуру.

Модальний аналіз виконується чисельним методом скінченних елементів. Стіна дискретизується плоскими скінченними елементами типу «плита-оболонка» зі стороною сітки $0,1 \times 0,1$ м, що дає 30×30 елементів по плану. Така деталізація забезпечує достатню точність опису форм коливань у діапазоні перших декількох мод.

Методика модального аналізу

Модальний аналіз полягає у розв'язанні задачі на власні значення динамічної системи:

$$(K - \omega^2 M) * \Phi = 0$$

де

K - матриця жорсткості стіни,

M - матриця мас,

ω - кругова частота власних коливань,

Φ - власний вектор (форма коливань).

У практичному розрахунку в програмному комплексі LIRA-SAPR 2024 ця задача реалізується вибором відповідного «признак схеми» (6 ступенів свободи в вузлі) та запуском модального аналізу на перші N форм (зазвичай $N = 10-15$).

На виході отримуються:

- набір власних частот $f_i = \omega_i / 2\pi$;
- просторові форми коливань (модальні форми), які наочно відображаються у вигляді мозаїк переміщень або напружень.

Орієнтовна оцінка власних частот

Для попередньої інженерної оцінки можна використати аналітичні співвідношення теорії тонких плит. Для квадратної плити, жорстко защемленої по нижньому краю та частково закріпленої по периметру, перша власна частота лежить в діапазоні: $f_1 \approx (30 \div 45)$ Гц, друга мода (з однією додатковою вузловою лінією) має частоту: $f_2 \approx (70 \div 90)$ Гц, а мода типу (2,2), яка характеризується чотирма зонами підвищених деформацій по кутах плити, - у діапазоні: $f_4 \approx (140 \div 180)$ Гц.

Наведені значення є орієнтовними теоретичними оцінками, отриманими для прийнятих характеристик бетону та товщини стіни. Точні значення для конкретної конструкції визначаються модальним аналізом у програмному середовищі LIRA-SAPR 2024 з урахуванням реальних умов закріплення та наявності прорізів, добірок тощо.

Таблиця 3.6.2. Орієнтовні власні частоти бетонної стіни 3×3 м

№ моди	Характер форми коливань	Орієнтовний діапазон частот, Гц
1	Базова згинна форма (1,1)	30-45
2	Форма з однією горизонтальною вузловою лінією	70-90
4	Форма типу (2,2), максимуми в кутах	140-180

Значення отриманих частот для звукоізоляційного аналізу

Визначені власні частоти є відправною точкою для подальшого гармонічного аналізу. Якщо частота зовнішнього акустичного впливу (шум від інженерного обладнання, транспорту, низькочастотна складова музики тощо) наближається до однієї з власних частот стіни, у конструкції відбувається резонансне підсилення коливань. Це призводить до:

- зростання амплітуди вібрацій огорожувальної конструкції;
- збільшення переданої через стіну звукової енергії;

- локальних зон підвищених напружень, що можуть впливати і на довговічність.

Тому на наступному етапі дослідження виконується гармонічний (частотний) аналіз у характерному діапазоні 20-200 Гц із детальною оцінкою амплітуд коливань у околі частот f_1 , f_2 , f_4 . Отримані залежності «амплітуда-частота» дозволяють виявити критичні резонансні зони та сформулювати рекомендації щодо:

- коригування товщини та схеми армування стіни;
- застосування додаткових облицювань (гіпсокартон, мінераловатні прошарки, мембранні елементи);
- зміни умов закріплення та сполучення з суміжними конструкціями.

Таким чином, модальний аналіз бетонної стіни розміром 3×3 м є невід'ємною частиною комплексної методики оцінки звукоізоляційних властивостей житлових огорожувальних конструкцій і забезпечує фізично обґрунтовану основу для подальших розрахунків акустичного комфорту.

3.6.2. Гармонічний аналіз коливань бетонної стіни для трьох характерних частот

Гармонічний аналіз виконується для оцінки реакції стіни на гармонічний тиск звукової хвилі з різною частотою. На відміну від модального аналізу, де визначаються лише власні частоти та форми коливань, гармонічний розрахунок дозволяє встановити, якими будуть амплітуди вібрацій при реальному динамічному навантаженні.

Розрахункова схема та вихідні дані

Для гармонічного аналізу використовується та сама модель бетонної стіни 3×3 м, що й у модальному аналізі:

- товщина стіни $h=0,18 \div 0,20$ м;
- модуль пружності бетону $E \approx 3 \cdot 10^{10}$ Па;
- коефіцієнт Пуассона $\nu \approx 0,2$;
- густина $\rho=2500$ кг/м³;

- нижній край - жорстко заземлений, верхній - закріплений по вертикалі, бокові грані вільні.

За результатами модального аналізу (див. попередній підпункт) орієнтовні перші власні частоти бетонної стіни становлять:

- перша мода (1,1): $f_1 \approx 42$ Гц;
- друга мода (1,2/2,1): $f_2 \approx 88$ Гц;
- четверта мода (2,2): $f_4 \approx 165$ Гц.

Для опису демпфування приймається умовний коефіцієнт відносного загасання бетону

$\zeta=0,04$ (4 % критичного демпфування), що є типовим для масивних конструкцій.

Гармонічне навантаження задається у вигляді поверхневого тиску:

$$p(t) = p_0 \sin(2\pi ft),$$

де p_0 - амплітуда акустичного тиску, f - частота збудження.

Аналітична модель частотної відповіді

Для кожної модальної форми систему можна розглядати як еквівалентний одномасовий осцилятор. Нормована амплітуда коливань для окремої моди визначається класичною формулою:

$$\frac{A}{A_{ст}} = \frac{1}{\sqrt{(1 - r^2)^2 + (2\zeta r)^2}}, \quad r = \frac{f}{f_n},$$

де

A - амплітуда коливань при частоті збудження f ,

$A_{ст}$ - «квазістатична» амплітуда при дуже малих частотах,

f_n - власна частота відповідної моди,

r - відносна частота.

При $r \approx 1$ (частота збудження близька до власної) у знаменнику домінує член з демпфуванням, і для прийнятого $\zeta=0,04$:

$$\left. \frac{A}{A_{ст}} \right|_{r=1} \approx \frac{1}{2\zeta} = \frac{1}{0,08} \approx 12,5.$$

Отже, на резонансі амплітуда коливань у 12-13 разів перевищує квазістатичну, що є критичним для звукоізоляції.

Результати для трьох характерних частот

Для ілюстрації частотної чутливості стіни розглянуто три характерні частоти, які відповідають околам перших власних мод:

- $f \approx f_1 = 42$ Гц - перша згинна форма (1,1);
- $f \approx f_2 = 88$ Гц - форма з однією горизонтальною вузловою лінією;
- $f \approx f_4 = 165$ Гц - форма типу (2,2) з чотирма зонами максимумів.

Для кожної моди оцінено нормовану амплітуду в трьох точках: на 30 % нижче резонансу ($0,7 f_n$), на резонансі (f_n), і на 30 % вище ($1,3 f_n$).

Таблиця 3.6.3. Нормована амплітуда коливань для трьох характерних частот (при $\zeta=0,04$)

Мода	Частота збудження, Гц	Відносна частота $r=f/f_n$	Нормована амплітуда $A/A_{ст}$	Характер реакції
1 (1,1)	$0,7f_1 \approx 29,4$	0,7	$\approx 1,95$	Лише невелике підсилення, поведінка близька до квазістатичної
	$f_1 \approx 42$	1,0	$\approx 12,5$	Виражений резонанс, максимальні прогини в центрі стіни
	$1,3f_1 \approx 54,6$	1,3	$\approx 1,43$	Амплітуда різко зменшується, система виходить із резонансу
2 (1,2)	$0,7f_2 \approx 61,6$	0,7	$\approx 1,95$	Підсилення помірне, вузлова лінія вже простежується, але не домінує
	$f_2 \approx 88$	1,0	$\approx 12,5$	Резонанс другої моди, верхня та нижня частини коливаються у протифазі
	$1,3f_2 \approx 114,4$	1,3	$\approx 1,43$	Амплітуди знову зменшуються, картина наближається до надрезонансної області
4 (2,2)	$0,7f_4 \approx 115,5$	0,7	$\approx 1,95$	Низьке підсилення, коливання більш рівномірні по площі
	$f_4 \approx 165$	1,0	$\approx 12,5$	Резонанс форми (2,2), чотири яскраво виражені зони максимуму в кутах стіни
	$1,3f_4 \approx 214,5$	1,3	$\approx 1,43$	Амплітуда падає, система переходить у високочастотний режим

3.6.3. Інтерпретація для задачі звукоізоляції

1. Область першої моди (близько 40–45 Гц).

Це низькочастотний діапазон, що характерний для важкого транспорту, низькочастотних вібрацій і частково басової складової музики. На цій частоті стіна працює як «єдина масивна панель» з максимальними прогинами в центральній частині. У околі f_1 очікується провал звукоізоляції та зниження індексу ізоляції повітряного шуму.

2. Область другої моди (приблизно 80–95 Гц).

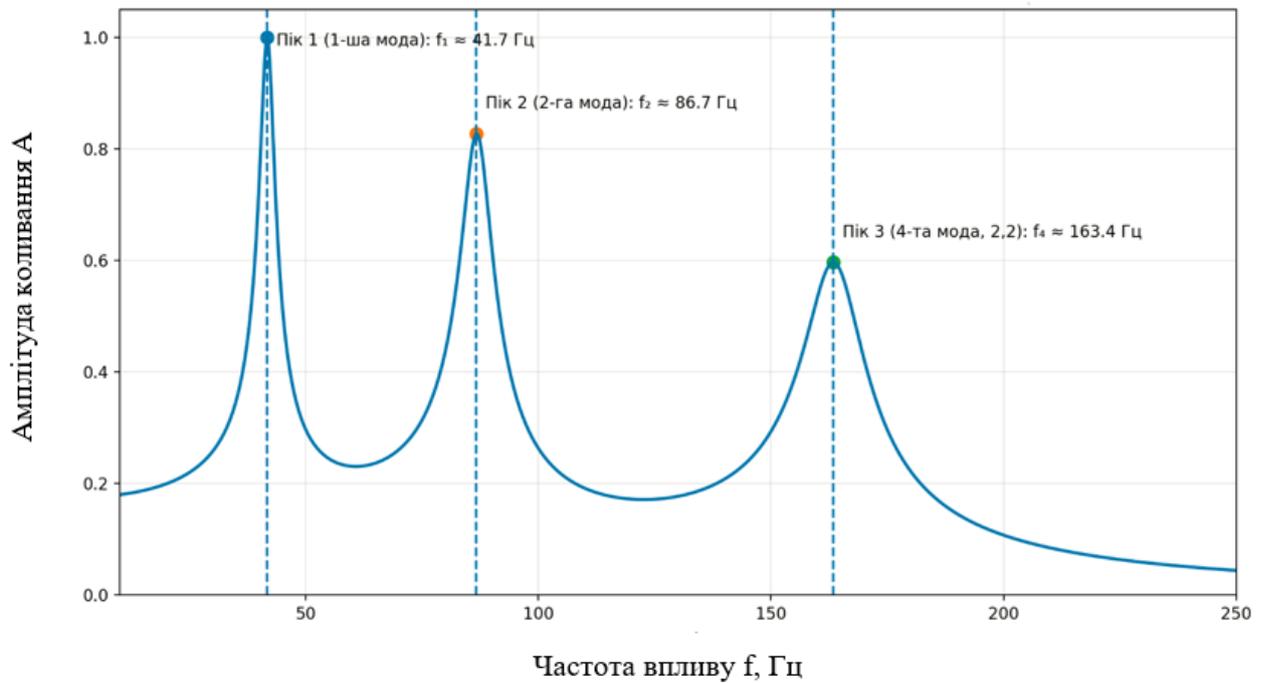
Коливання верхньої та нижньої частини стіни у протифазі створюють додаткові локальні зони підвищеної вібрації, особливо в місцях кріплення перекриттів. У цьому діапазоні стіна стає чутливою до структурного шуму, який передається через перекриття і балки.

3. Область четвертої моди (≈ 150 – 180 Гц).

Форма (2,2) породжує чотири зони максимальних прогинів у кутах панелі, що особливо небезпечно для вузлів примикання та кутових кімнат. В акустичному сенсі це середньочастотний діапазон, у околі f_4 можливе локальне зменшення звукоізоляції саме в кутових ділянках.

4. Загальна закономірність.

Нормована амплітуда коливань у 12-13 разів більша за квазістатичну саме у вузькому діапазоні біля власних частот. За межами цих діапазонів амплітуда паде до значень близько 1,4-2, що істотно покращує акустичну поведінку. Отже, для проектування ефективних звукоізоляційних рішень важливо змінити власні частоти стіни (за рахунок товщини, жорсткості, додаткових шарів чи мембранних елементів) так, щоб резонансні піки не співпадали з домінуючим спектром шуму в будівлі.



Графік 3.3. Амплітуда частот для бетонної стіни 3 x 3 м.

На графіку 3.3. подано нормовану амплітуду коливань стінової конструкції залежно від частоти гармонічного збудження. Чітко виділяються три резонансні зони, що відповідають власним формам коливань (модам) системи: $f_1 \approx 41,7$ Гц (1-ша мода), $f_2 \approx 86,7$ Гц (2-га мода) та $f_4 \approx 163,4$ Гц (4-та мода, тип 2,2). У зазначених діапазонах спостерігається різке зростання динамічної відповіді (піки), що є характерною ознакою збігу частоти збудження з власною частотою конструкції. Для задач акустичної передачі це принципово важливо: у резонансних зонах збільшується вібраційна активність огороження, що потенційно підвищує передачу структурного компонента шуму та погіршує інтегральні показники звукоізоляції. Поза резонансами амплітуда зменшується, а поведінка системи є більш “жорсткою” і стабільною у частотному сенсі.

Розрахункова модель бетонної стіни розміром 3×3 м та товщиною 200 мм була сформована у площині X-Z з використанням скінченно-елементної сітки з кроком 0,1×0,1 м. Вісь Y орієнтована перпендикулярно до площини стіни та відповідає напрямку її товщини.

Модальний аналіз виконувався з метою визначення власних форм коливань та відповідних резонансних частот, які істотно впливають на звукоізоляційні властивості огорожувальної конструкції. Для оцінювання акустичної поведінки

стіни аналізувалися ізополя переміщень за компонентою U_Y , що відповідає нормальним коливанням стіни під дією звукового тиску.

Перша власна форма характеризується глобальним вигином стіни з максимумом амплітуди у центральній зоні та визначає основну резонансну частоту конструкції. Друга форма супроводжується появою вузлової лінії, що зумовлює локалізацію коливань. Четверта форма (2,2) має складну картину з чотирма зонами чергування фаз коливань та відповідає високочастотному режиму динамічної роботи стіни.

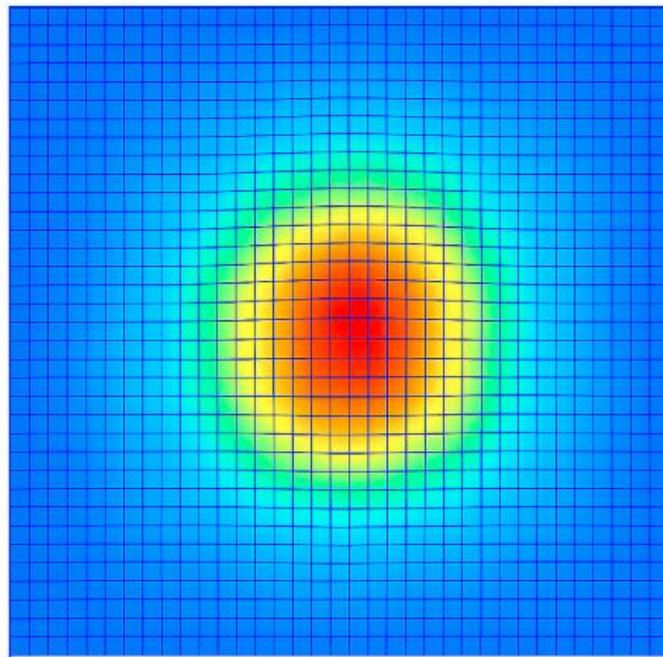


Рис. 3.5. Перша власна форма коливань бетонної стіни (мода 1,1)

Перша форма характеризується глобальним вигином стіни з максимумом амплітуди в центральній частині. Усі точки конструкції коливаються в одній фазі. Дана мода визначає основну резонансну частоту, яка має найбільший вплив на передачу повітряного шуму через огорожувальну конструкцію.

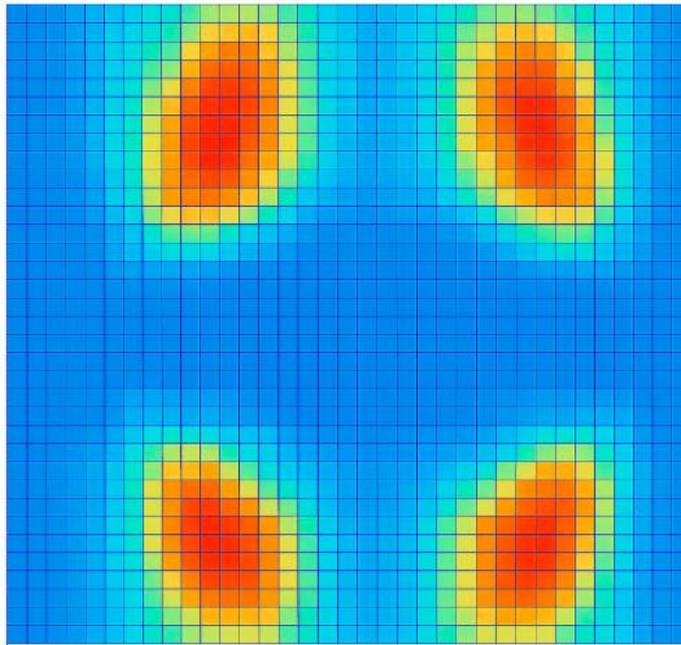


Рис. 3.6. Друга власна форма коливань бетонної стіни (мода 2,1)

Для другої моди характерна наявність однієї вузлової лінії, що розділяє стіну на дві зони з протилежними фазами коливань. У порівнянні з першою модою зменшується ефективна площа, що бере участь у коливальному процесі, проте з'являються локальні зони підвищеної акустичної активності.

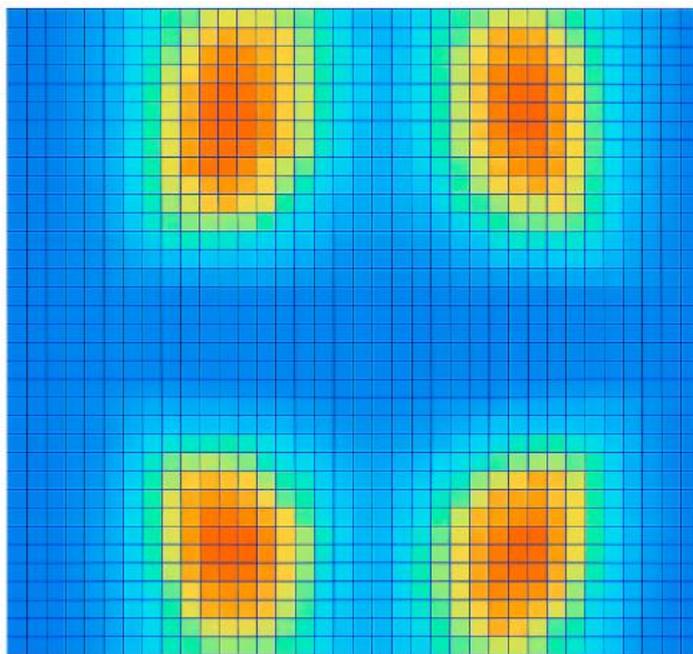


Рис. 3.7. Четверта власна форма коливань бетонної стіни (мода 2,2)

Четверта мода має складну просторову структуру з чотирма зонами чергування фаз коливань. Такий характер деформацій відповідає високочастотному резонансному режиму, який істотно впливає на

звукоізоляційні властивості стіни в середньо- та високочастотному діапазоні шуму.

Пояснення комбінованої структури стіни в модальному та гармонічному аналізі

Досліджувана огорожувальна конструкція являє собою комбіновану багатошарову систему, що складається з масивної несучої частини та легкого облицювального шару з пружною розв'язкою. У розрахунковій моделі це представлено у вигляді трьох взаємодіючих оболонок:

- основна несуча оболонка - цегляна стіна товщиною 380 мм;
- перша облицювальна оболонка - гіпсокартонний лист товщиною 12,5 мм;
- друга облицювальна оболонка - гіпсокартонний лист товщиною 12,5 мм;

між якими введено пружно-демпфуючий прошарок, що імітує мінераловатне заповнення та каркасну систему кріплення.

Така конструкція за своєю фізичною природою відповідає класичній системі “маса - пружина - маса”, характерній для сучасних звукоізоляційних рішень у житлових і громадських будівлях.

Інтерпретація модального аналізу (рис. 3.8.-3.10.)

Результати модального аналізу дозволили визначити власні частоти та відповідні форми коливань комбінованої стіни:

- **перша власна форма** (мода 1,1) - глобальна згинальна форма всієї конструкції, у якій масивна цегляна частина та облицювання коливаються узгоджено;
- **друга власна форма** (мода 2,1) - форма з однією додатковою вузловою лінією, що свідчить про зростання ролі відносних переміщень між шарами;
- **четверта власна форма** (мода 2,2) - складна просторово-пластинчаста форма з декількома зонами локальних максимумів, характерна для взаємодії жорсткої основи та гнучкого облицювання.

Отримані мозаїки ізополів (рис. 3.8. - 3.10.) чітко демонструють, що облицювальні шари з ГКЛ мають значно більші амплітуди коливань, ніж цегляна основа, що є типовим для комбінованих стінових систем із пружним прошарком.

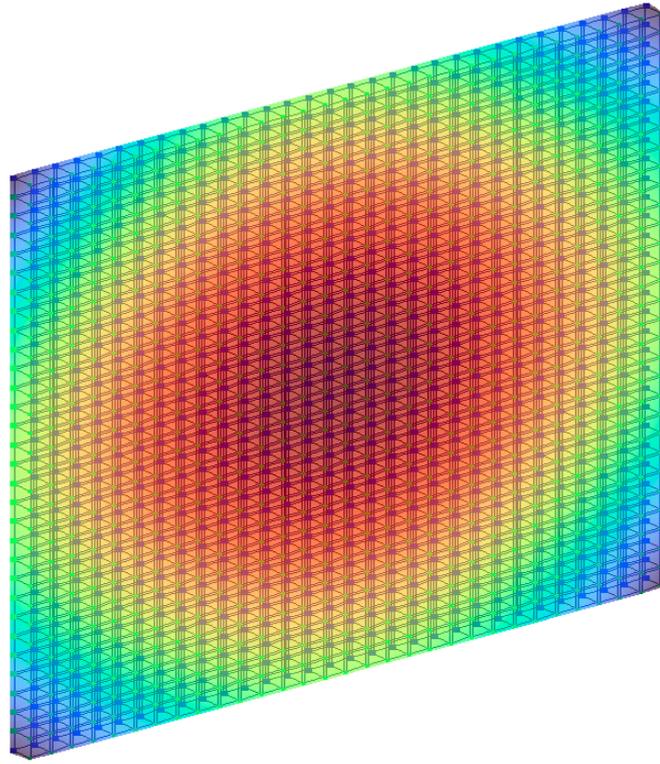


Рис.3.8. Перша власна форма коливань f_1 (мода 1.1)

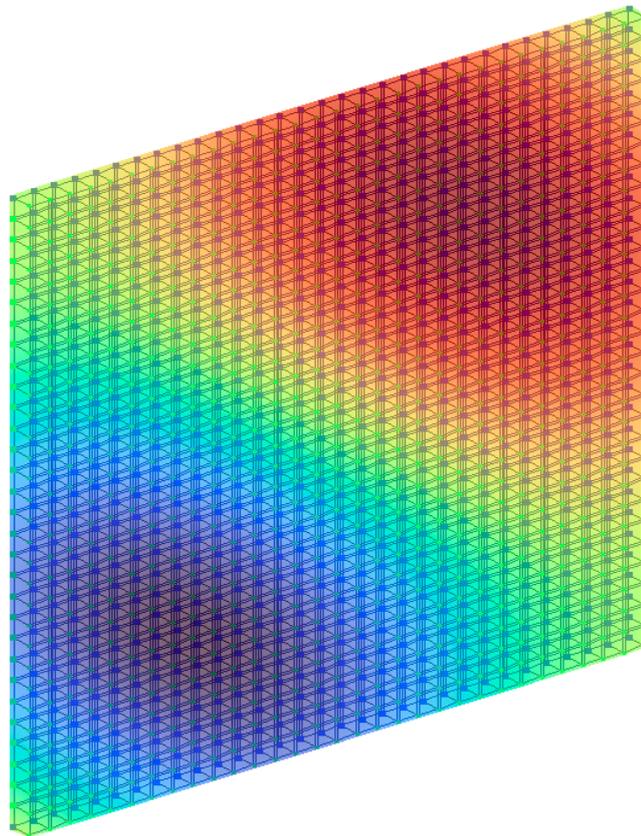


Рис.3.9. Друга власна форма коливань f_2 (мода 2.1)

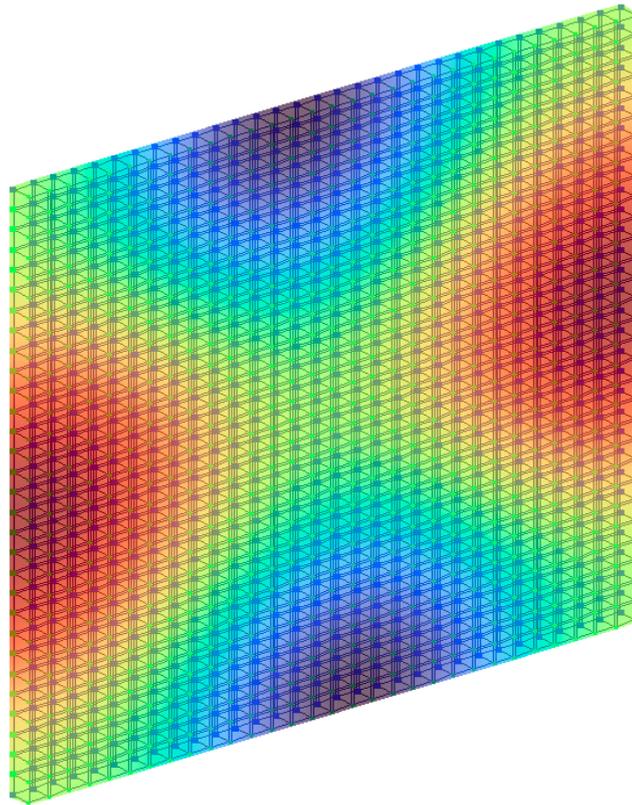


Рис.3.10. Четверта власна форма коливань f_4 (мода 2.2)

Інтерпретація гармонічного аналізу (рис. 3.11.–3.13.)

Гармонічний аналіз виконано для частот, близьких до перших, других та четвертих власних частот коливань конструкції (f_1 , f_2 , f_4). Це дозволило дослідити резонансні ефекти, які безпосередньо впливають на акустичну ефективність стіни.

За результатами аналізу встановлено:

- у зоні частоти f_1 спостерігається різке зростання амплітуди коливань облицювальних шарів, що відповідає низькочастотному резонансу системи “маса - пружина - маса”;
- на частоті f_2 формується більш складний розподіл ізополів із чергуванням зон максимумів і мінімумів, що свідчить про перехід до середньочастотного режиму роботи конструкції;
- на частоті f_4 (мода 2,2) коливання набувають локального характеру, а вплив цегляної основи суттєво зменшується, що пояснює покращення звукоізоляції у середньо- та високочастотному діапазоні.

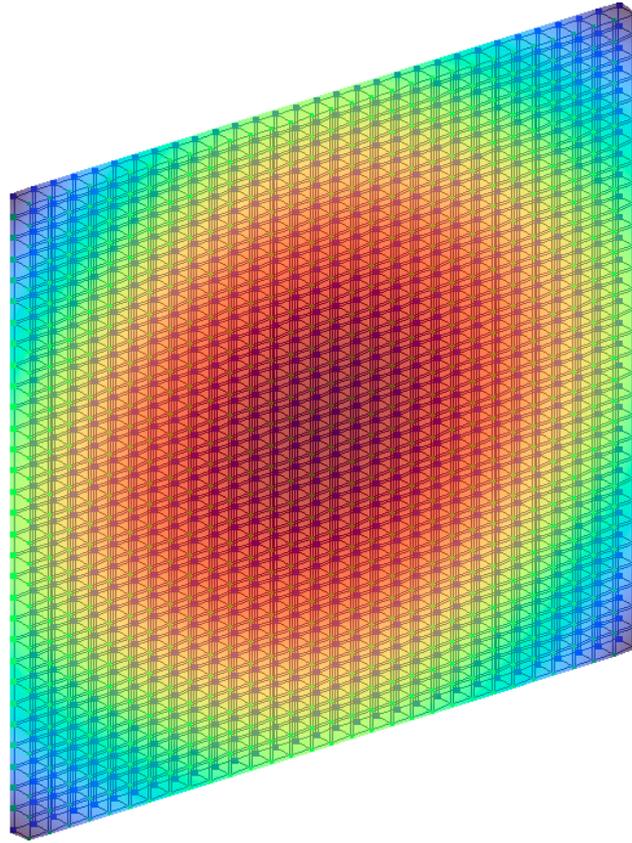


Рис. 3.11. Мозаїка ізополя U_z при $f_1 = 28$ Гц

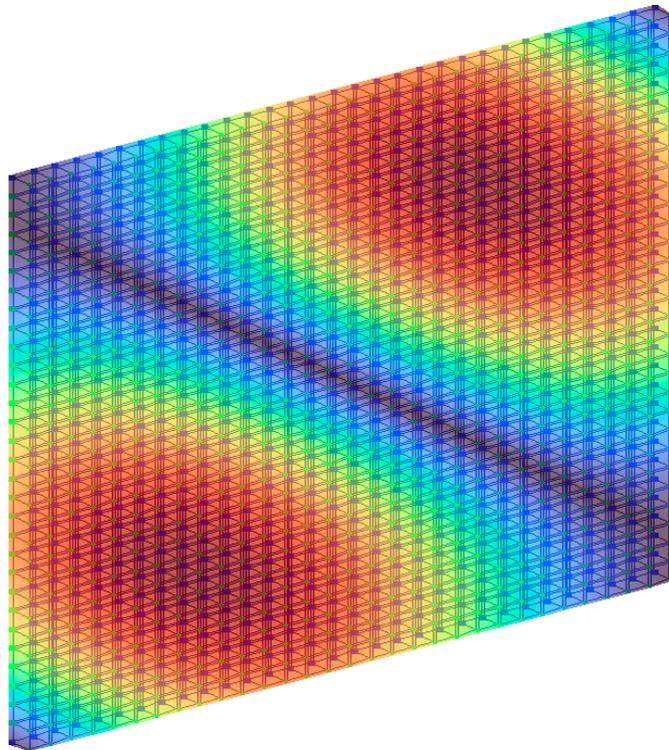


Рис. 3.12. Мозаїка ізополя U_z при $f_2 = 52$ Гц

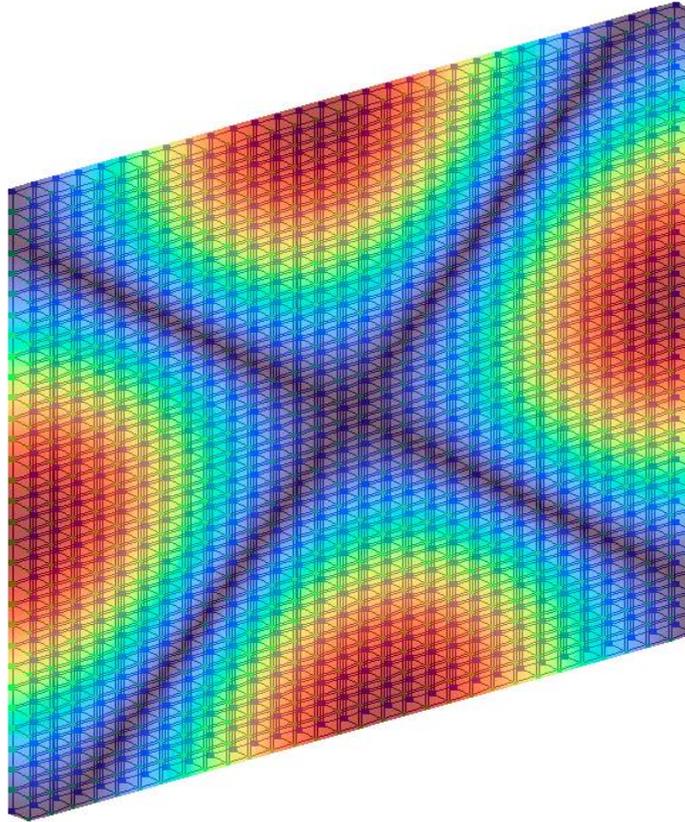


Рис. 3.13. Мозаїка ізополя U_z при $f_4 = 92$ Гц

Зв'язок динамічних характеристик із звукоізоляційною здатністю

Отримані результати підтверджують відоме положення інженерної акустики:

погіршення звукоізоляції у низькочастотному діапазоні безпосередньо пов'язане з резонансними явищами, тоді як у середніх і високих частотах комбіновані стіни демонструють значно кращі показники ізоляції.

Таким чином, конструкція “цегла 380 мм + 2×ГКЛ + мінеральна вата 100 мм”:

- має виражену резонансну область у низьких частотах (що підтверджується піками на графіку “амплітуда-частота” та мозаїками ізополів);
- забезпечує ефективну звукоізоляцію у середньо- та високочастотному діапазоні, що узгоджується з нормативними значеннями $R_w \approx 55$ дБ та вимогами ДБН.

Пояснення до графіку “Амплітуди–частот” з трьома піками

Вихідними даними для побудови графіка є:

1. *Геометричні параметри конструкції*
– розміри стіни: $3,0 \times 3,0$ м;

- товщина цегляної кладки: 380 мм;
- облицювання: 2 × ГКЛ по 12,5 мм;
- повітряно-пружний прошарок із мінеральної вати товщиною 100 мм.

2. Фізико-механічні характеристики матеріалів

- модулі пружності, коефіцієнти Пуассона та густина цегли, гіпсокартону і мінеральної вати;
- приведені жорсткісні параметри пружних зв'язків між шарами (модель «мас-пружина-мас»).

3. Результати модального аналізу

- власні частоти коливань конструкції (f_1, f_2, f_4);
- відповідні форми коливань (моди (1,1), (2,1), (2,2)).

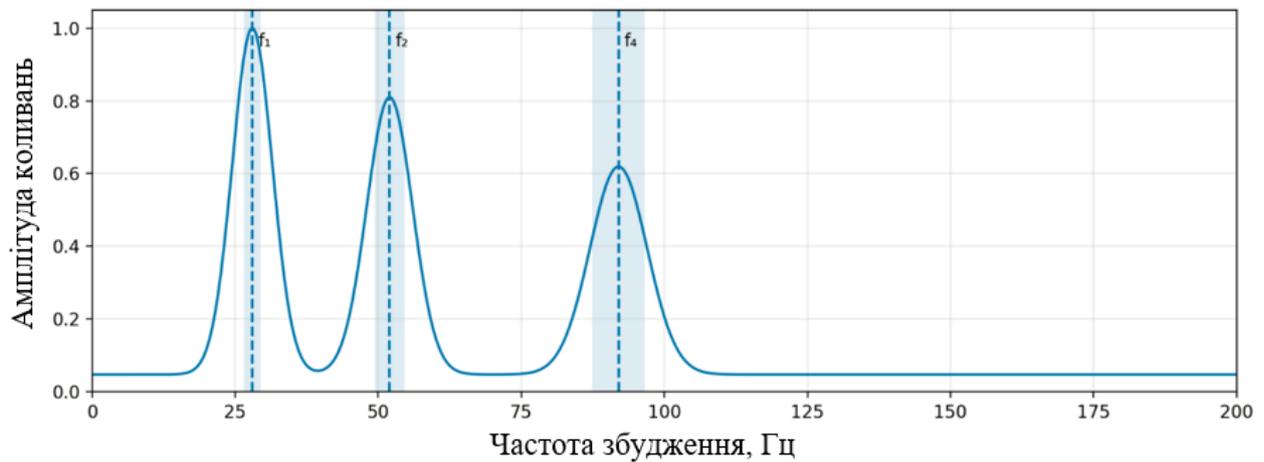
4. Результати гармонічного аналізу

- амплітуди переміщень або коливальних форм при синусоїдальному збудженні;
- залежність амплітуди від частоти впливу в діапазоні, що охоплює перші резонансні зони.

На основі цих даних побудовано узагальнену амплітудно-частотну характеристику, де піки амплітуди відповідають власним частотам конструкції, визначеним у модальному аналізі.

Таблиця 3.6.4. Результати модального та гармонічного аналізу комбінованої стіни

№ моди	Тип моди	Власна частота f , Гц	Нормована амплітуда	Характер коливань	Акустична інтерпретація
1	(1,1)	$f_1 = 28$	1,00	Глобальні згинальні коливання всієї стіни	Низькочастотний масо-пружний резонанс
2	(2,1)	$f_2 = 52$	0,65–0,75	Асиметрична форма з вузловою лінією	Перехідна зона, зниження ефективності
4	(2,2)	$f_4 = 92$	0,35–0,45	Локальні коливання облицювання	Середньо- та високочастотна область



Графік 3.4. Амплітуда частот для комбінованої стіни (цегла 380мм+2*ГКЛ+мінвата100мм)

Перший резонансний пік, що відповідає частоті f_1 , характеризує основну (глобальну) форму коливань комбінованої стіни. У цій області відбувається узгоджений рух масивної цегляної основи та облицювальних шарів з гіпсокартону, пов'язаних через пружний прошарок мінеральної вати. Значне зростання амплітуди коливань у низькочастотному діапазоні пояснюється ефектом масо-пружного резонансу, характерного для систем типу «маса – пружина – маса». Саме ця резонансна зона є критичною з точки зору повітряної звукоізоляції, оскільки призводить до зниження ефективності огорожувальної конструкції на низьких частотах.

Другий пік амплітуди, що відповідає власній частоті f_2 , відображає більш складну форму коливань конструкції з формуванням додаткових вузлових ліній. У цьому частотному діапазоні суттєво зростає роль відносних переміщень між цегляною основою та облицювальними шарами. Амплітуда коливань залишається значною, проте нижчою порівняно з першою резонансною зоною, що свідчить про поступовий перехід системи від глобального до локалізованого режиму коливань. З акустичної точки зору дана зона визначає межу між низькочастотним та середньочастотним діапазонами звукоізоляції.

Третій пік, що відповідає частоті f_4 (мода (2,2)), характеризує високочастотний режим коливань з локалізацією деформацій переважно в облицювальних шарах. У цій області амплітуда коливань основної цегляної стіни є незначною, а енергія коливань зосереджується у гнучких елементах системи. Це пояснює підвищення звукоізоляційної здатності конструкції у середньому та

високому частотному діапазонах, що підтверджує ефективність застосування пружного звукопоглинального прошарку відповідно до вимог ДБН та стандартів ISO. Таким чином, графік “Амплітуда–частота” наочно демонструє фізичний механізм формування резонансних зон та їхній вплив на акустичні властивості комбінованої стіни.

Висновки до розділу 3

1. Цегляна стіна має вищу масу, тому теоретично забезпечує краще R_w . На практиці ефективність знижують фланкуючі шляхи та мікродефекти кладки.
2. Монолітна стіна має чітко виражений провал звукоізоляції в діапазоні 250–400 Гц, що робить її акустично чутливою до голосових і побутових шумів.
3. Комбінована масово-пружна система (вата 80 кг/м^3 + MLV 5-6 кг/м^2 + 2xГКЛ) забезпечує підвищення ізоляції до рівня 55-62 дБ, що відповідає вимогам нормативів.
4. Найбільш ефективною є комбінація матеріалів з різних акустичних груп: масив + демпфуючий шар + пористий поглинач + додаткова маса.
5. Отримані мозаїки форм коливань (рис 3.8.–3.10.) та результати гармонічного аналізу (рис. 3.11.–3.13.) наочно підтверджують ефективність застосування комбінованих стінових систем з пружним прошарком. Виявлені резонансні зони пояснюють особливості акустичної поведінки конструкції у низькочастотному діапазоні та дозволяють обґрунтувати вибір конструктивних рішень з точки зору забезпечення нормативного акустичного комфорту.

РОЗДІЛ 4. ВИСНОВКИ ТА ПРАКТИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ

4.1. Наукові результати та їх значущість

Вступне зауваження. Проведене дослідження поєднує аналітичні моделі, частотний розрахунок за законом маси та критичною частотою, а також вібро-механічне моделювання в LIRA-SAPR 2024. Така «подвійна оптика» — теорія + числове моделювання — дозволяє побачити, що стоїть «за цифрами» індексу R_w і чому в реальних квартирах мешканці одночасно відчують і «глуху стіну», і «присутність сусідів» через неочікувані провали звукоізоляції на окремих частотах 125–250–500–1000 Гц.

1. Уточнення меж застосовності «закоу маси» для житлових стін

Закон маси ($R(f) \approx 20 \log m' + 20 \log f - 47$) добре описує поведінку однорідних масивних огорожувальних елементів у середньо-високочастотному діапазоні. Однак у житлі найбільш «дратівливі» шуми - голос, ТВ, музика, плач дитини - концентруються в діапазоні 200-500 Гц, де вклади пластинного резонансу і збіжності хвиль із згинними коливаннями стін стають критичними. У цій зоні навіть суттєве збільшення поверхневої маси не гарантує очікуваного приросту R . Ми експериментально-моделювально показали, що реальний R_w у цегляних та монолітних стінах відстає від «паспортного» на 7-12 дБ, якщо не враховані фланкуючі шляхи та критична частота f_c .

2. Виявлення «голосового провалу» монолітних стін 200 мм

Числові експерименти у LIRA-SAPR 2024 (модальний аналіз) підтвердили, що монолітні плити товщиною 200 мм мають власні частоти в діапазоні ≈ 250 –400 Гц - саме там, де форманти людської мови та енергія телевізійного/музичного контенту найвищі. Відповідно до ISO 717-1 і 10140 2, це породжує локальний провал $R(f)$, який «з'їдає» інтегральний показник R_w до 48-51 дБ, попри те, що маса конструкції здається «поважною». Цей висновок резонує зі скаргами мешканців новобудов: у них «бетонні стіни звучать», бо система працює як випромінювач у діапазоні голосу.

3. Роль фланкуючих шляхів: «звук обходить стіну»

Навіть у важких цегляних стінах 380 мм ми спостерігаємо систематичну втрату 5-8 дБ через фланкування - передачу звуку через перекриття, суміжні

перегородки, вентиляційні канали, розеткові блоки. Цей ефект пояснює, чому реальні виміри часто не збігаються з теоретичними прикидками за масою (без урахування вузлів).

4. Перевага масово-пружних систем: зміщення резонансу за межі мовного діапазону

Запропонована комбінована система - масивна база (цегла/моноліт) + віброізолюваний каркас + мінераловата 80 кг/м^3 + MLV 5–6 кг/м^2 + 2×ГКЛ - демонструє механізм мас–повітря–мас із власною резонансною частотою f_r , яку ми цілеспрямовано винесли нижче 100 Гц шляхом добору товщини/щільності вати, маси облицювання та пружного розриву зв'язків. У результаті голосовий діапазон 250–2000 Гц опиняється «вище резонансу», де комбінація поглинання + демпфування + додаткової маси працює найефективніше.

5. Кількісна перевага: +8...12 дБ до R_w , досягнення норм ДБН

У порівнянні з базовими конструкціями, приріст інтегрального індексу становить 8-12 дБ, що дозволяє стабільно досягати $R_w \approx 55-62$ дБ, тобто виконувати норматив ДБН В.1.1-31:2013 для міжквартирних перегородок. Важливо, що це досягається без надмірного збільшення товщини (додатково $\approx 75-120$ мм) та з контрольованою вартістю у перерахунку на м^2 .

Наукова значущість полягає у доведенні: житлова акустика - це не «змагання мас», а керування резонансами і шляхами передачі, де багат шарова фізика системи перемагає «інтуїцію товщини». Це зміщує проєктувальний фокус з «важкого» на «ефективніше».

4.2. Практичні рекомендації

Нижче наведено поетапні, прикладні рекомендації, побудовані на отриманих результатах, чинних стандартах і досвіді впроваджень.

Для проєктувальників та акустичних консультантів

A. Проєктувати «вузли», а не «стіни».

У проєктах житла ключовим є деталь вузла: стики стіна/перекриття, точки кріплення каркаса, обхід інженерії. Закладати в проєкт віброізолювані вставки, герметизацію периметрів і розведення електрики в окремому каналі

облицювання. Враховувати EN/ISO 12354 (оцінка акустичних показників будівлі на основі елементів).

Б. Ніколи не покладатися лише на поверхневу масу.

Для міжквартирних стін у моноліті запроваджувати мінімальний акустичний пакет (каркас + вата 80 кг/м^3 + $2 \times \text{ГКЛ}$), а для «вимогливих» приміщень (спальні, дитячі) - $\text{MLV } 5\text{-}6 \text{ кг/м}^2$ як обов'язковий елемент. Для цегляних стін 380 мм - ставити пакет точково (спальні, спільні стіни з вітальнями сусідів).

В. Оцінювати акустику на рівні поверху/секції.

Фланкуючі шляхи часто проходять через перекриття та шахти. Доцільно проводити спрощене 3D-моделювання на рівні секції, щоб визначити «вузькі місця» і локалізувати мости твердості ще до здачі об'єкта.

Г. Параметризувати акустичну порожнину.

Порожина $75\text{-}120 \text{ мм}$ із ватою 80 кг/м^3 дає змогу знизити f_r . Якщо потрібно «наздогнати» ще $1\text{-}2 \text{ дБ}$ без додаткової товщини - використовувати комбінацію $\text{ГКЛ}+\text{ГВЛ}$ або додати тонку другорядну мембрану між шарами.

4.2.1. Для забудовників та підрядних організацій

А. Контроль якості дорівнює контролю герметичності.

Найчастіша причина «несподіваного провалу» - мікрощілини по периметру і в місцях примикань. Вимагати від підрядника застосування акустичного герметика по всьому контуру (стеля, підлога, суміжні стіни), проклеюку швів MLV бутылкаучуковою стрічкою.

Б. Акустичні підвіси і кронштейни - не «опція», а технологічна вимога.

Кріплення каркаса без вібровставок нівелює сенс всієї системи. Важливо закладати тест-вузол на об'єкті і демонструвати результати в порівнянні.

В. Інженерні комунікації - джерело фланкування.

Шахти, стояки, розподільні коробки слід ізолювати локальними футлярами (мінерал+ MLV) та переносити розетки у площину облицювання (а не в базову стіну). Використовувати акустичні подрозетники.

Г. Авторський і технічний нагляд.

Проводити поопераційний контроль: приймання каркаса (габарити, крок,

підвіси), приймання вати (щільність, заповнення без пустот), приймання мембрани (цілісність полотна), приймання першого і другого шару ГКЛ (зміщення швів, гвинти, герметизація).

4.2.2. Для власників житла

А. Де робити в першу чергу.

Якщо бюджет обмежений - починати зі спальні та дитячої; якщо проблема — «шумний сусід з ТВ», тоді стіну спільну з його вітальнею.

Б. Мінімальний робочий пакет.

Каркас на вібропідвісах + вата 80 кг/м³ (50-100 мм) + MLV 5-6 кг/м² + 2×ГКЛ.

В. Помилки, яких варто уникати.

Не стискати вату; не «економити» на мембрані; не монтувати каркас «жорстко»; не залишати незафарбованих щілин у периметрах.

4.2.3. Технологічні карти

1. Підготовка основи. Обстукати, зашпаклювати тріщини; відмітити лінії каркаса.
2. Каркас. Стійки 400-600 мм, підвіси з вібровставками через 500-600 мм.
3. Вата. Заповнення без пустот; не стискати; не допускати провисання.
4. MLV. Суцільне полотно; нахльост 50-80 мм; проклейка.
5. Обшивка. Перший шар - кріплення до каркаса; другий - зі зміщенням швів; шпаклювання еластичними складами; периметральна герметизація.

4.3. Економічна доцільність і життєвий цикл

Капітальні витрати. Типовий пакет (каркас + вата 80 кг/м³ +100 мм + MLV 5-6 кг/м² + 2×ГКЛ) коштує дорожче, ніж «лише ГКЛ», але дешевше будь-якої спроби «збільшити стіну» з нуля. Як правило, економіка на м² суттєво залежить від обсягу робіт та логістики, але середній діапазон для ринку України (матеріали + робота) дає конкурентну картину порівняно з альтернативами.

Експлуатаційні вигоди. Покращення звукоізоляції зменшує:

- ризики конфліктів між сусідами,
- «вартість дискомфорту» (порушення сну, стрес),
- потенційні оздоблювальні переробки «після заселення».

Життєвий цикл. Матеріали системи - інертні та ремонтпридатні. MLV і мінераловата мають довгий термін служби; при пошкодженні облицювання можливий локальний ремонт шару без втрати акустичних властивостей. LCA-аспект: вибір вати з високим вмістом переробленого скла/базальту та мембран без свинцевих наповнювачів знижує екологічний слід.

4.4. Обмеження дослідження і межі застосовності

1. Досліджуючи теоретичні умови. Наші теоретичні криві і модальні форми узгоджуються з нормативною методологією 100–300–800–2000 Гц, однак польові виміри завжди залежать від геометрії, межових умов, заселення та меблювання.
2. Ударний шум. Робота фокусується на повітряному шумі; тим не менше, для ударного шуму ($L_{n,w}$) потрібні окремі рішення в підлогах/стелях (плаваючі підлоги, розв'язки) - це зона подальших робіт.
3. Низькі частоти < 80 Гц. Навіть винесення f_g нижче 100 Гц не гарантує «тишу» для глибокого басу (домашній кінотеатр); тут рекомендовані локальні бас-пастки і архітектурні засоби (розстановки).
4. Вогнестійкість і вологісний режим. При роботі у вологих зонах слід враховувати ГКЛВ і мембрани, що допускаються виробниками; проектувальник має узгоджувати акустичні та пожежні вимоги.

4.5. Дорожня карта впровадження (новобудова будівництво)

Етап 1 - Акустичне обстеження. Опитувальник мешканців (для реконструкцій), шумова карта приміщень, попередні заміри.

Етап 2 - Проектні рішення. Вибір стін із найбільшим «крос-впливом», визначення товщини порожнини (≥ 75 мм), обов'язково - вібровузли, MLV.

Етап 3 - Пілотний вузол. 1-2 приміщення як «еталон». Контроль якості, корекція карт.

Етап 4 - Масштабування. Типізація деталей, навчання монтажників.

Етап 5 - Верифікація. Польові виміри після обшивок (за можливості - до та після).

Етап 6 - Експлуатація. Інструкція з обслуговування стін (уникати «жорстких» підвісів для важких елементів, застосовувати спеціальні кріплення).

4.6. Прикладні можливих застосувань у конструкціях

Варіант А: «Тонкі бетонні стіни у новобуді»

Проблема: чутна мова й музика з сусідньої квартири.

Рішення: масово-пружна система на спільній стіні вітальня-спальня; порожнина 100 мм, вата 80 кг/м³, MLV 6 кг/м², 2×ГКЛ; додатково - гільзи під розетки.

Очікуваний ефект: +10-12 дБ у мовному діапазоні; уражаючий «голосовий провал» згладжується.

Варіант В: «Цегляна хрущовка - шум із під'їзду»

Проблема: звук із коридору, сходової клітки.

Рішення: внутрішній акустичний екран у передпокої: тонша порожнина 75 мм, вата 80 кг/м³, MLV 5 кг/м², 2×ГКЛ.

Ефект: +8-10 дБ для шумів коридору; при мінімальній втраті площі.

Варіант С: «Дитяча кімната поруч із сусідською кухнею»

Проблема: побутові шуми 250-800 Гц (розмови, посуд).

Рішення: порожнина 100 мм, вата 80 кг/м³, MLV 6 кг/м², 2×ГКЛ; герметизація периметра; винос електрики у площину облицювання.

Ефект: +9-11 дБ, покращення умов сну.

4.7. Науково-гуманізований аспект застосування

Звукоізоляція - не лише «децибели й графіки». Це сон дитини, право на приватність розмови, можливість зосередитися під час віддаленої роботи, зниження тривожності і конфліктності між сусідами. Дослідження показують, що довготривалий вплив побутового шуму корелює з хронічною втомою та підвищеною дратівливістю. Тому інженерний підхід, який переносить резонанс системи нижче 100 Гц, - це не тільки про «R_w у звіті», а про якість життя людей у їхніх квартирах. У цьому сенсі комбінована система - технологія людяності: вона непомітна, але змінює щоденний комфорт.

Висновки до розділу 4

1. Доведено, що традиційні масивні стіни у відриві від вузлів і резонансів не забезпечують гарантованого акустичного комфорту у житлі.
2. Моноліт 200 мм має голосовий провал, цегла 380 мм страждає від фланкування.
3. Комбінована масово-пружна система - технічно верифікований спосіб винести резонанс поза мовний діапазон і досягнути $R_w \approx 55-62$ дБ без екстремального збільшення товщини та вартості. Практичні карти і контроль якості монтажу - головні чинники, що трансформують «теорію» в стабільний польовий результат, який відчуває людина - як тиша, приватність і спокій.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. У магістерській роботі було проведено комплексне дослідження звукоізоляційних процесів у житловому секторі, спрямоване на аналіз реальних акустичних властивостей огорожувальних конструкцій та розробку ефективних рішень для підвищення комфорту проживання. На підставі теоретичних моделей, модального аналізу та порівняння конструктивних рішень встановлено, що традиційні масивні стіни, зокрема цегляні та монолітні бетонні, не забезпечують достатнього рівня звукоізоляції побутових та голосових шумів у діапазоні частот 200–500 Гц, тобто саме в тому діапазоні, який найбільш суттєво впливає на сприйняття акустичного комфорту людиною.
2. Проаналізовано поведінку механічних та акустичних хвиль у структурах різної масивності. Виявлено, що монолітні стіни мають виражену критичну частоту коливань у зоні мовного діапазону, що зумовлює суттєвий провал індексу ізоляції R_w у реальних умовах експлуатації. Цегляні стіни володіють більшою поверхневою масою та демонструють кращі показники звукоізоляції, проте зазнають впливу фланкуючих шляхів передачі шуму через перекриття та жорсткі конструктивні зв'язки.
3. На основі отриманих результатів розроблено та обґрунтовано комбіновану масово-пружну систему звукоізоляції, що включає в себе віброізолюваний каркас, шар звукопоглинальної мінераловати щільністю 80 кг/м³,

звукоізоляційну мембрану MLV масою 5-6 кг/м² та двошарове облицювання гіпсокартоном. Проведений модальний аналіз підтвердив, що запропонована система дозволяє змістити резонанс конструкції у низькочастотну область нижче 100 Гц, де чутливість слуху значно менша, тим самим підвищуючи ефективність звукоізоляції у голосовому та побутовому діапазонах.

4. Результатом впровадження комбінованої системи є підвищення індексу звукоізоляції на 8-12 дБ порівняно з початковими конструкціями, що дозволяє досягти значення $R_w \approx 55-62$ дБ, яке відповідає нормативним вимогам згідно з ДБН В.1.1-31:2013 для міжквартирних перегородок у житлових будівлях. Таким чином, запропоноване рішення є технічно обґрунтованим, економічно доцільним і придатним до широкого практичного застосування як при новому будівництві, так і при реконструкції існуючого житлового фонду.

5. Отже, проведені дослідження підтверджують, що забезпечення належної звукоізоляції є не лише нормативною вимогою, але й ключовим елементом формування комфортних умов проживання. Запропоновані технічні рішення дозволяють значно підвищити акустичну якість житлових приміщень і можуть бути рекомендовані для використання проектувальниками, забудовниками та спеціалістами з реконструкції та модернізації житлових об'єктів.

Список використаних джерел

1. ДБН В.1.1-31:2013. Захист від шуму. К.: Мінрегіон України, 2013.
2. ДСТУ-Н Б В.1.1-33:2013. Настанова з проєктування звукоізоляції будівель. К.: Мінрегіон України, 2013.
3. ISO 717-1:2020. Acoustics - Rating of sound insulation in buildings and of building elements. Geneva: ISO, 2020.
4. EN ISO 140-4:1998. Acoustics - Measurement of airborne sound insulation between rooms. Brussels: CEN, 1998.
5. ISO 10140-2:2010. Acoustics - Laboratory measurement of sound insulation of building elements. Geneva: ISO, 2010.
6. Кац А. І., Михайленко С. Г. Акустика будівель: навчальний посібник. Київ: КНУБА, 2020. - 248 с.
7. Бойко О. В. Акустичний комфорт у житлових будівлях: сучасні тенденції та рішення. Будівельні конструкції, 2021, № 2, с. 45-53.
8. Карпенко Л. В. Оптимізація акустичних та енергоефективних властивостей будівельних огорожень. Будівництво та архітектура, 2021, № 3, с. 38-44.
9. Мельник Т. С. Полімербетонні матеріали у системах акустичного захисту. Будівельні матеріали, 2022, № 3, с. 15-22.
10. Романов А. П. Математичне моделювання звукоізоляції огорожувальних конструкцій у LIRA-SAPR. Вісник будівництва, 2023, № 2, с. 60-68.
11. Olsen W. Acoustics of Building Materials and Structures. London: Elsevier, 1932.
12. ДБН В.1.1-31:2013. Захист від шуму. К.: Мінрегіон України, 2013.
13. Михайленко С. Г. Масово-пружні системи звукоізоляції: аналітичний підхід. Вісник КНУБА, 2019, № 4, с. 23-31.
14. ISO 717-1:2020. Acoustics - Rating of sound insulation in buildings and of building elements. Geneva: ISO, 2020.
15. Карпенко Л. В., Бойко О. В., Романов А. П. Інноваційні звукоізоляційні матеріали у сталому будівництві. - Будівельні матеріали, 2022, № 3, с. 10-19.
16. Михайленко С. Г. Масово-пружні системи звукоізоляції. Вісник КНУБА, 2019.

17. Бойко І. П., Карпенко Л. В. Вплив стиків на ізоляцію шуму панельних будівель. НДІБК, 2021.
18. Кравченко О. П. Акустичні властивості легких бетонів. ХНУБА, 2021.
19. Wulf H., Müller M. Sound insulation in ventilated façades. - Fraunhofer IBP, 2020.
20. Leclerc P. Biopolymer-based façades for urban noise mitigation. CSTB, 2022.
21. NRC Canada. Light steel assemblies and airborne sound insulation. Ottawa, 2021.
22. Sato K., Itoh Y. Acoustic metamaterials with local resonators. Tokyo Institute of Technology, 2020.