

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Біда Дмитро Вячеславович

УДК 621.391.83

ДИСЕРТАЦІЯ
МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ ЗВУКОІЗОЛЯЦІЇ
БАГАТОШАРОВИХ КОНСТРУКЦІЙ

17 – Електроніка та телекомунікації

171 – Електроніка

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

_____ / Біда Д.В.

Науковий керівник Дідковський Віталій Семенович, доктор технічних наук,
професор

Київ - 2023

АНОТАЦІЯ

Біда Д.В. Методи розрахунку звукоізоляції багатошарових конструкцій. – Кваліфікаційна робота на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 171 «Електроніка». – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», МОН України, Київ, 2023.

Дисертаційна робота присвячена дослідженню методів розрахунку звукоізоляції будівельних конструкцій та впливу матеріалів багатошарових конструкцій на якісні показники звукоізоляції.

Зміст дисертаційного дослідження викладено в чотирьох розділах, де представлено та обґрунтовано основні результати роботи.

Актуальність дисертаційної роботи обґрунтовано у вступі, де сформульовано мету та задачі дослідження, описано методи дослідження, надано інформацію про наукову новизну та практичне значення одержаних результатів.

У першому розділі наведена важливість питання звукоізоляції у приватному житті. Наведено загальні дані щодо типів шумів та шляхів передачі шуму по конструкція будівель. Приведено приклади типових матеріалів для звукоізоляції та віброізоляції. Представлені практичні приклади використання таких матеріалів у процесі звуко- та віброізоляції різних об'єктів. Наведено приклади діючих чинних та актуальних методів розрахунку звукоізоляції тонких листових матеріалів, однорідних масивних огорожень, та багатошарових огорожуючих конструкцій без шару звукоізолюючих матеріалів.

У другому розділі наведений аналітичний (розрахунковий) метод визначення індексу звукоізоляції однорідних панелей, багатошарових конструкцій та багатошарових конструкцій з кріпленням. Приведений алгоритм розрахунку за допомогою існуючого програмного забезпечення Insul. Наведена методика проведення експериментальних досліджень ізоляції повітряного шуму огорожуючими конструкціями. Представлені результати натурних

експериментів та даних отриманих за допомогою Insul. Проведено порівняльний аналіз даних отриманих за експериментами та отриманих за допомогою Insul.

У третьому розділі наведено методику проведення експериментальних досліджень, вимоги до вимірювальної техніки та вимірювальних приміщень. Наведено експериментальні дані та дані з натурних вимірювань об'єктів. А саме наведені результати досліджень масивних огорожувальних конструкцій, масивних конструкцій з обшивками різного типу. Представлено дані досліджень конструкцій з різними товщинами звукопоглинального шару та різною кількістю шарів звукоізоляційного облицювання. Проаналізовано залежність значень звукоізоляції конструкції від товщини звукопоглинального шару та від кількості шарів звукоізоляційного облицювання.

У четвертому розділі представлено новий метод розрахунку звукоізоляції багатошарових конструкцій. Описано повний алгоритм розрахунку індексу ізоляції повітряного шуму будівельними огорожуючими конструкціями. Приведено графічне та табличне порівняння даних експериментальних досліджень, даних отриманих за допомогою програмного забезпечення Insul та запропонованої методики. Оцінено точність методів.

Представлені в дисертації нові теоретичні та практичні результати можна рекомендувати до використання при розробці національних будівельних стандартів, проєктуванню будівельних об'єктів різного призначення, а також в навчальному процесі вищих навчальних закладів України для підготовки інженерів-акустиків.

В дисертаційній роботі отримано наступні **наукові результати**:

1. Вперше розроблено графічний метод визначення індексу звукоізоляції багатошарових конструкцій з використанням різних за класами матеріалів, в тому числі з урахуванням товщини матеріалу, щільності та товщини звукоізоляційного облаштування ;

2. Розроблено вдосконалений метод визначення впливу звукопоглинальних матеріалів на звукоізоляційні характеристики багатошарових конструкцій;
3. Удосконалено метод оцінки впливу товщини повітряного проміжку на звукоізоляційну ефективність конструкції стін з облицюванням на основі металевого каркасу;
4. Визначено якісні зміни частотних характеристик звукоізоляції багатошарових конструкцій, основаних на масивних акустичнооднорідних матеріалах, які облицьовані листовими матеріалами і мають в основі каркасної системи.
5. Виділено подальше впровадження методу оцінки звукоізоляції будівельних огорожуючих конструкцій з використанням різних матеріалів каркасу.

Практичне значення отриманих результатів полягає у наступному:

1. Ефективніші рішення в проектуванні: Нова методика розрахунку дозволяє точніше враховувати характеристики багатошарових неоднорідних конструкцій, що робить проектування більш точним та надійним. Це спрощує процес проектування та надає можливість виконувати проєкт згідно з вимогами, що наведені у державних будівельних стандартах. Так наприклад рівень звукоізоляції легких конструкцій можна покращити використовуючи облицювання шаром гіпсокартоном на дерев'яному каркасі. Таким чином можна досягти покращення індексу звукоізоляції на 4 дБ.
2. Економія ресурсів та коштів: Завдяки вдосконаленим розрахункам та їх вищій точності, стає реальним уникнення надмірного використання будівельних матеріалів, що в сукупності призводить до значної економії як коштів, так і природних ресурсів у сфері будівництва. Це важливий крок у напрямку сталого розвитку, оскільки раціональне використання

матеріалів веде до зменшення відходів і покращує екологічний відбиток будівництва. Крім того, оптимізація використання ресурсів сприяє зменшенню негативного впливу на довкілля, адже менше відходів означає менше виробничого навантаження та забруднення. Такий підхід не лише ефективний у відношенні витрат, але й сприяє створенню більш сталого та екологічно освідомленого будівельного сектору. Наприклад для покращення індексу звукоізоляції легких пористих (газоблок, тощо) конструкцій можна виконати фарбування з одного або двох боків, що призведе до збільшення індексу звукоізоляції в середньому на 3 дБ.

3. Підвищення якості звукоізоляції: Розроблена нова методика виявляє та враховує раніше непомічені фактори, які впливають на звукоізоляцію. Це призводить до покращення якості звукоізоляційних рішень і підвищує комфорт для мешканців будівлі. Новий підхід дозволяє уникнути упущень у визначенні параметрів, що впливають на ефективність звукоізоляції, і сприяє створенню більш ефективних і адаптованих рішень у галузі архітектури та будівництва. Це також відкриває можливості для розробки нових технологій та матеріалів звукоізоляції, що враховують різноманітні аспекти впливу на звук та гарантують високий ступінь комфорту для жителів будівлі. Наприклад для більш ефективного захисту від низьких частот (менше 200 Гц) доцільно збільшувати товщину звукопоглинаючого шару. При товщині 50 мм на частоті 100 Гц $R_w=21$ дБ, а при 200 мм на частоті 100 Гц з $R_w=34$ дБ.

Ключові слова: звукоізоляція, звукоізоляція будівельних конструкцій, розрахунок звукоізоляції, каркасні системи звукоізоляції, захист від шуму.

SUMMARY

Bida D.V. Methods of calculating sound insulation of multilayer structures. - Qualification work on manuscript rights.

Dissertation for obtaining the scientific degree of Doctor of Philosophy in specialty 171 "Electronics". - National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute named after Ihor Sikorskyi", MES of Ukraine, Kyiv, 2023.

The dissertation work is devoted to the research of methods of calculating the sound insulation of building structures and the influence of materials of multilayer structures on the qualitative indicators of sound insulation.

The content of the dissertation research is presented in four chapters, where the main results of the work are presented and substantiated.

The relevance of the dissertation work is substantiated in the introduction, which formulates the purpose and tasks of the research, describes the research methods, provides information about the scientific novelty and practical significance of the obtained results.

In the first chapter, the importance of soundproofing in private life is given. General data on the types of noise and the ways of noise transmission through the construction of buildings are given. Examples of typical materials for sound insulation and vibration insulation are given. Practical examples of the use of such materials in the process of sound and vibration insulation of various objects are presented. Examples of effective and up-to-date methods of calculating the sound insulation of thin sheet materials, homogeneous massive fences, and multi-layered enclosing structures without a layer of sound-insulating materials are given.

The second chapter provides an analytical (calculation) method for determining the sound insulation index of homogeneous panels, multilayer structures and multilayer structures with fasteners. The given calculation algorithm using the existing Insul software. The method of conducting experimental studies of air noise isolation by enclosing structures is presented. The results of natural experiments and data obtained

with the help of Insul are presented. A comparative analysis of data obtained by experiments and obtained with the help of Insul was carried out.

In the third chapter, the methodology of conducting experimental studies, requirements for measuring equipment and measuring premises are given. Experimental data and data from natural measurements of objects are given. Namely, the results of studies of massive enclosing structures, massive structures with various types of cladding are presented. The research data of structures with different thicknesses of the sound-absorbing layer and different number of layers of sound-insulating cladding are presented. The dependence of the sound insulation values of the structure on the thickness of the sound-absorbing layer and on the number of layers of sound-insulating cladding was analyzed.

The fourth chapter presents a new method of calculating the sound insulation of multilayer structures. The complete algorithm for calculating the index of air noise insulation by building enclosing structures is described. A graphical and tabular comparison of experimental research data, data obtained using the Insul software, and the proposed methodology is provided. The accuracy of the methods was assessed.

The new theoretical and practical results presented in the dissertation can be recommended for use in the development of national construction standards, the design of construction objects for various purposes, as well as in the educational process of higher educational institutions of Ukraine for the training of acoustic engineers.

The following **scientific results** were obtained in the dissertation work:

1. For the first time, a graphical method of determining the sound insulation index of multilayer structures using different classes of materials, including taking into account the thickness of the material, density and thickness of the sound insulation arrangement, was developed;
2. An improved method of determining the effect of sound-absorbing materials on the sound-insulating characteristics of multilayer structures has been developed;

3. The method of assessing the effect of the thickness of the air gap on the sound insulation efficiency of the structure of walls with cladding based on a metal frame has been improved;
4. Qualitative changes in the frequency characteristics of the sound insulation of multilayer structures based on massive acoustically homogeneous materials, which are lined with sheet materials and have a frame system as a basis, have been determined.
5. The further implementation of the method of sound insulation assessment of building enclosing structures using different frame materials is highlighted.

The **practical significance** of the obtained results is as follows:

1. More effective solutions in design: The new calculation method allows to more accurately take into account the characteristics of multi-layer heterogeneous structures, which makes the design more accurate and reliable. This simplifies the design process and provides an opportunity to implement the project in accordance with the requirements specified in the state construction standards. So, for example, the level of sound insulation of light structures can be improved using a layer of plasterboard on a wooden frame. In this way, it is possible to achieve an improvement in the sound insulation index by 4 dB.
2. Savings of resources and money: Thanks to improved calculations and their higher accuracy, it becomes real to avoid excessive use of construction materials, which in aggregate leads to significant savings of both money and natural resources in the field of construction. This is an important step in the direction of sustainable development, as the rational use of materials leads to a reduction in waste and improves the ecological footprint of construction. In addition, optimizing the use of resources helps to reduce the negative impact on the environment, because less waste means less production load and pollution. This approach is not only cost-effective, but also contributes to a more sustainable and environmentally conscious construction sector. For

example, to improve the sound insulation index of light porous (gas block, etc.) structures, you can paint one or two sides, which will increase the sound insulation index by an average of 3 dB.

3. Improving the quality of sound insulation: The developed new technique detects and takes into account previously unnoticed factors that affect sound insulation. This leads to an improvement in the quality of soundproofing solutions and increases comfort for the building's residents. The new approach allows you to avoid omissions in the determination of parameters affecting the effectiveness of sound insulation and contributes to the creation of more effective and adapted solutions in the field of architecture and construction. It also opens up opportunities for the development of new technologies and sound insulation materials that take into account various aspects of sound impact and guarantee a high degree of comfort for the building's residents. For example, for more effective protection against low frequencies (less than 200 Hz), it is advisable to increase the thickness of the sound-absorbing layer. At a thickness of 50 mm at a frequency of 100 Hz $R_w=21$ dB, and at a thickness of 200 mm at a frequency of 100 Hz with $R_w=34$ dB.

Key words: sound insulation, sound insulation of building structures, sound insulation design, frame sound insulation systems, noise protection.

Список публікацій здобувача

1. Заєць В.П., Котенко С.Г., Біда Д.В. Аналітичний розв'язок задачі знаходження ефективності частково імпедансних шумозахисних екранів. // Sciences of Europe. 2021. Vol. 1. P. 38-47. <https://doi.org/10.24412/3162-2364-2021-81-1-38-47>
2. Біда Д.В., Пушечнікова Т., Заєць В.П. Методи розрахунку звукоізоляції багатошарових конструкцій // Мікросистеми, Електроніка та Акустика. 2020. V. 25 (2). P. 50-56. <https://doi.org/10.20535/2523-4455.me.197298>
3. Bida D.V., Zaretskyi V.Y. Research of sound insulation frequency response for a multilayer inhomogeneous wall structures. // Technology audit and production reserves. 2022. Vol. 4. № 2 (66). P. 37-4. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.262262>
4. Bida D.V., Didkovskyi V.S. Descriptors of sound insulation of building structures in residential buildings in Ukraine and Europe // Technology audit and production reserves. 2022. Vol. 5. № 2 (67) P. 25-29. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.265816>
5. Zaets V. P., Bida D.V. Influence of sound-absorbing properties of noise protection barriers on road traffic participants // Technology audit and production reserves. 2021. Vol. 6. № 1 (62). P. 14-18. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2021.244597>

Доповіді на конференціях:

1. Біда Д.В., Зарецький В.Ю., Заєць В.П. Звукоізоляційні властивості багатошарових стінових конструкцій на основі гкл. // «Теорія і практика сучасної науки» III міжнародна наукова-практична конференція м. Київ, 2018
2. Біда Д.В., Зарецький В.Ю., Котенко С.Г. Актуальні проблеми проектування та будівництва звукоізоляційних покрівель. // «Теорія і практика сучасної науки» III міжнародна наукова-практична конференція м. Київ, 2018

ЗМІСТ

| | |
|---|----|
| ВСТУП..... | 14 |
| 1 ОГЛЯД ЗАГАЛЬНИХ ЗАСАД ЗВУКОІЗОЛЯЦІЇ..... | 20 |
| 1.1 Важливість розгляду питання звукоізоляції у приватному житлі | 22 |
| 1.2 Типи шумів та шляхи передачі звуку в житлі | 25 |
| 1.3 Засоби та матеріали звукоізоляції, віброізоляції..... | 26 |
| 1.3.1 Мінеральна вата..... | 27 |
| 1.3.2 Пінопласт..... | 28 |
| 1.3.3 Матеріали мембранного типу..... | 28 |
| 1.3.4 Листові матеріали та конструкції..... | 29 |
| 1.4 Засоби звукоізоляції..... | 30 |
| 1.5 Засоби віброізоляції..... | 31 |
| 1.6 Чинні методи розрахунку звукоізоляції | 34 |
| 1.6.1 Звукоізоляція листових матеріалів (тонких перегородок) | 35 |
| 1.6.2 Звукоізоляція однорідних масивних огорожень..... | 37 |
| 1.6.3 Розрахунок ізоляції повітряного шуму багатошаровими огороджувальними конструкціями | 42 |
| 1.7 Програмне забезпечення для розрахунку ізоляції повітряного шуму.... | 51 |
| 1.8 Висновки до розділу 1 | 54 |
| 2 АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ МЕТОДІВ ЗВУКОІЗОЛЯЦІЇ | 56 |
| 2.1 Аналітичні дослідження..... | 56 |
| 2.1.1 Однорідні панелі..... | 56 |
| 2.1.2 Багатошарові конструкції | 61 |
| 2.1.3 Багатошарові конструкції зі кріпленням | 62 |
| 2.2 Комп'ютерне моделювання | 65 |
| 2.2.1 Моделювання за допомогою INSUL..... | 65 |
| 2.2.2 Порівняльний аналіз комп'ютерного моделювання та експериментальних даних..... | 67 |
| 2.3 Висновки до розділу 2..... | 73 |
| 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ | 75 |
| 3.1 Методика проведення експериментальних досліджень | 75 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 3.1.1 | Вимоги до вимірювальних приміщень | 75 |
| 3.1.2 | Експериментальні дослідження. Загальні дані | 78 |
| 3.2 | Експериментальні дослідження масивних огорожувальних конструкцій..... | 84 |
| 3.3 | Дослідження конструкції масивних стін з обшивками..... | 89 |
| 3.3.1 | Базові конструкції..... | 89 |
| 3.3.2 | Вплив товщини звукопоглинаючого матеріалу (вати) між обшивкою та стіною..... | 94 |
| 3.3.3 | Вплив кількості шарів обшивки на збільшення звукоізоляції | 100 |
| 3.4 | Висновки до розділу 3 | 104 |
| 4 | МЕТОД РОЗРАХУНКУ ЗВУКОІЗОЛЯЦІЇ МАСИВНИХ ОГОРОДЖЕНЬ З ЛИСТОВИМ ОБЛИЦЮВАННЯМ НА ОСНОВІ КАРКАСУ | 106 |
| 4.1 | Метод розрахунку звукоізоляції багатошарових конструкцій..... | 106 |
| 4.2 | Висновки до розділу 4 | 117 |
| | ВИСНОВКИ | 118 |
| | ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ | 121 |
| | ДОДАТОК А Список опублікованих праць за темою дисертації..... | 124 |
| | Додаток Б Результати експериментів з натурних об'єктів з різними конструкційними елементами (перегородками) | 126 |

ВСТУП

Актуальність роботи. У 21 столітті ми не можемо уявити сьогодення без стресу, викликаним постійним рухом та шумом, спричиненим різними чинниками. В містах, де ритм життя прискорений, а інфраструктура розвинена до неймовірних масштабів, питання звукоізоляції постає особливо актуальним. Необхідність звукоізоляції житла виходить далеко за рамки простої зручності – це питання комфорту, здоров'я та якості життя.

Однією з головних переваг звукоізоляції є забезпечення тиші у приміщенні. І не лише в нічний час, коли потреба у відновленні сил найвища. Шум впливає на нас 24/7, порушуючи наш режим дня, знижуючи продуктивність та викликаючи стрес. Постійний шум може призвести до порушень сну, зростання агресивності та подразливості, а також сприяти розвитку серйозних психологічних захворювань.

У сучасних будинках та квартирах, де стіни тонкі, а ізоляція слабка, зовнішній шум безперешкодно проникає всередину. Він може бути викликаний рухом автотранспорту, роботами на будівництві, музикою з сусідніх квартир, чи будь-яким іншим джерелом. Звукоізоляція стін та стелі може значно знизити рівень зовнішнього шуму, зробивши приміщення тихим та комфортним.

Також важливо враховувати внутрішній шум – звуки, які створюються всередині будинку. Щоденні звуки такі як кроки, розмови, дзижчання електроприладів можуть заважати, особливо коли потрібно концентруватися на роботі або відпочивати. Звукоізоляція перекриття та підлоги може допомогти зменшити передачу внутрішнього шуму між поверхами та кімнатами.

Необхідність звукоізоляції особливо важлива для тих, хто проживає в багатоповерхових будинках чи має сусідів зверху, знизу і з боку. Відчуття приватності та спокою у власному будинку є ключовим для психологічного здоров'я. Звукоізоляційні матеріали та конструкції дозволяють зменшити звукову передачу через стіни та підлогу, зберігаючи вашу приватність.

Окрім того, звукоізоляція є важливою умовою для комфортного навчання та роботи вдома. Зростання популярності дистанційної освіти та роботи робить звукоізоляцію ще більш актуальною. Звуки ззовні можуть впливати на якість вашої продуктивності впродовж дня, тому важливо створити відокремлене та тихе середовище.

Загалом, необхідність звукоізоляції житла є актуальним та важливим питанням. Це питання не лише про зручність та комфорт, а й про збереження фізичного, психічного здоров'я та високої якості життя. Інвестування у звукоізоляцію може призвести до помітних позитивних змін у вашому добробуті та забезпечити те, на що заслуговує кожен – тишу та спокій у власному домі.

Мета і завдання дослідження. *Метою дисертаційної роботи є вдосконалення та розробка нових методів розрахунку звукоізоляції будівельних багатошарових конструкцій, а також залежності індексу звукоізоляції від наповнення конструкції.*

Об'єктом дослідження є метод розрахунку звукоізоляції повітряного шуму будівельними конструкціями з урахуванням основних параметрів та характеристик огорожувальної конструкції.

Предметом дослідження є математична модель/система математичних рівнянь спрямованих на розрахунок звукоізоляції повітряного шуму багатошаровими будівельними конструкціями.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити такі *завдання*:

1. Розглянути загальні засади звукоізоляції. Встановити основні засоби та матеріали для звуко- та віброізоляції. Встановити основні фізичні характеристики, що впливають на звукоізоляційні системи в яких використовуються дані матеріали
2. Дослідити математичну залежність ефективності конструкції від товщини шару звукопоглинання. Порівняти результати з аналогічними системами.

3. Виконати аналітичний огляд методів розрахунку звукоізоляції багатошарових конструкцій. Виокремити підходи які дозволяють розрахувати систему з додаванням шару звукопоглинання, або знайти підходи які хоча б приблизно дозволяли врахувати порожнини конструкції.
4. Порівняти експериментальні дані з іншими джерелами. Порівняти запропонований метод (отриману систему рівнянь) розрахунку звукоізоляції та результати експериментальних даних та даних отриманими за допомогою стороннього програмного забезпечення.

Методи дослідження. Для досягнення поставленої мети використано методи аналітичного та комп'ютерного моделювання, а також методи експериментального оцінювання індексу звукоізоляції повітряного шуму. При аналітичному оцінюванні використовувалися загальноприйняті формули для розрахунку звукоізоляції більш простих систем. При комп'ютерному моделюванні використовувалося закордонне ПЗ із закритим кодом, без можливості вивчення точного алгоритму розрахунку. При експериментальному дослідженні використовувалися результати натурних експериментів, які проводив здобувач. При аналізі результатів, шляхом виокремлення загальних характеристик та властивостей конструкції, отримано загальні математичні формули. На основі загальних математичних моделей розрахунку розроблено методику представлену у роботі.

Достовірність отриманих результатів підтверджується збігом теоретичних даних з результатами експериментальних досліджень.

Наукова новизна роботи:

У дисертації представлено наступні наукові результати:

1. Вперше розроблено графічний метод визначення звукоізоляції багатошарової конструкції з різними класами матеріалів;

2. Удосконалено метод визначення впливу звукопоглинальних матеріалів на звукоізоляційні характеристики багатошарових конструкцій;
3. Удосконалено метод оцінки впливу товщини повітряного проміжку на звукоізоляційну здатність стін з облицюванням на основі металевих каркасів;
4. Знайшов подальше впровадження способів оцінки звукоізоляції огороження на основі металевих каркасів.
5. Визначено якісні зміни частотних характеристик звукоізоляції багатошарових конструкцій на основі масивних акустичнооднорідних матеріалів з облицюванням листовими матеріалами по каркасу.

Особистий внесок здобувача. Усі результати, наведені у дисертаційній роботі і винесені на захист, отримано за активної участі здобувача та опубліковано у спеціалізованих фахових виданнях.

У роботі «Аналітичний розв’язок задачі знаходження ефективності частково імпедансних шумозахисних екранів». Заєць В.П., Котенко С.Г., Біда Д.В. «Sciences of Europe», 2021, опублікованій у співавторстві, здобувач особисто моделював та був співавтором програмного коду у середовищі Matlab.

У роботі «Методи розрахунку звукоізоляції багатошарових конструкцій.» Біда Д.В., Пушечнікова Т., Заєць В.П. «Мікросистеми, Електроніка та Акустика 25 (2)», 2020, опублікованій у співавторстві, здобувач особисто займався розробкою методології, подальший розвиток якої вказаний у дисертаційній роботі.

У роботі «Research of sound insulation frequency response for a multilayer inhomogeneous wall structures», Bida D.V., Zaretskyi V.Y., «Технологічний аудит та резерви виробництва» №4(66)2022, опублікованій у співавторстві, здобувач особисто проводив експериментальні дослідження, частина яких використовується у дисертаційній роботі.

У роботі «Influence of sound-absorbing properties of noise protection barriers on road traffic participants.» Заєць В.П., Біда Д.В. «Technology audit and

production reserves», 2021, опублікованій у співавторстві, здобувач особисто проводив збір даних, вимірювання та проводим розрахунок отриманих даних що використовувалися при написанні статті.

У роботі «Descriptors of sound insulation of building structures in residential buildings in Ukraine and Europe» Біда Д.В., Дідковський В.С., Technology audit and production reserves», №5/2(67) 2022, опублікованій у співавторстві, здобувач особисто проводив аналіз та збір даних щодо методів опису коефіцієнтів звукоізоляції які використовуються у країнах Європи.

Практичне значення отриманих результатів. Практичне значення отриманих результатів полягає у створенні ефективних рішень для проєктування. Нова методика розрахунку дозволяє більш точно враховувати характеристики багатошарових неоднорідних конструкцій, що робить проєктування більш точним та надійним. Це спрощує процес проєктування та надає можливість виконувати проєкт згідно з вимогами, що наведені у державних будівельних стандартах. Економія ресурсів та коштів. Завдяки більш точним розрахункам можливе уникнення надмірного використання матеріалів, що призводить до економії коштів та ресурсів у будівництві та підвищення якості звукоізоляції. Нова методика дозволяє виявити та врахувати раніше непомічені фактори, що впливають на звукоізоляцію. Це призводить до покращення якості звукоізоляційних рішень та комфорту для мешканців будівлі.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертаційного дослідження доповідались на 2 міжнародних науково-практичних конференціях:

1. Звукоізоляційні властивості багатошарових стінових конструкцій на основі гкл. Біда Д.В., Зарецький В.Ю., Заєць В.П. «Теорія і практика сучасної науки» III міжнародна наукова-практична конференція м. Київ, 2018

2. Актуальні проблеми проектування та будівництва звукоізоляційних покрівель. Біда Д.В., Зарецький В.Ю., Котенко С.Г. «Теорія і практика сучасної науки» III міжнародна наукова-практична конференція м. Київ, 2018

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 7 наукових публікацій (з них 4 статті у наукових фахових виданнях України за спеціальністю 171 Електроніка, в т.ч. 1 стаття у якій число співавторів (разом із здобувачем) більше двох осіб, 1 стаття в інших виданнях), 2 доповіді у збірниках матеріалів конференцій.

Структура та обсяг дисертаційної роботи. Робота складається зі вступу, чотирьох розділів, списку використаних джерел із 27 найменувань та 2 додатки. Робота містить 76 рисунків та 30 таблиць. Загальний обсяг дисертаційної роботи складає 147 сторінок.

1 ОГЛЯД ЗАГАЛЬНИХ ЗАСАД ЗВУКОІЗОЛЯЦІЇ.

Звук – механічні хвилеподібні коливальні рухи у газах, рідинах та твердих тілах. Тому звукова енергія може розглядатися як особливий вид механічної енергії.

Частинки матерії, виведені зі стану спокою, здійснюють коливальні рухи і, після деякого проміжку часу, повертаються до початкового стану. При цьому можуть виникати хвилеподібні коливальні рухи, оскільки кожна частка матерії пов'язана з суміжними частинками пружними силами і приводить їх в коливальний рух.

Якщо матерії надати векторний імпульсний напрямок руху вздовж поширення хвилі, то ці частинки виконують рух вздовж та в зворотному напрямку до вектору руху. При цьому утворюються згущення та розрідження частинок. Згущенню часток відповідає підвищений, ділянкам розрідження – знижений тиск. Такі хвилі називаються у фізиці поздовжніми. Поздовжні хвилі можуть спостерігатися у всіх типах середовищ: наведених вище. У повітрі та воді можуть поширюватися лише поздовжні хвилі, що пояснюється їх пружними властивостями.

Якщо імпульс передано у напрямі, перпендикулярному до напрямку поширення хвилі, ефект виходить зовсім інший. Частинки, що сприйняли імпульс, здійснюють поперечний напрямок поширення хвилі коливальний рух, причому вона захоплює за собою суміжну частинку, з якою вона пов'язана пружними силами. Остання у свою чергу захоплює за собою наступну частинку: кожна наступна за часом частка, виведена зі стану спокою, досягає максимуму усунення її положення в стані спокою завжди з деяким запізненням у порівнянні з попередньою. Хвилі цього виду називаються поперечними. Поперечні хвилі виникають лише за певних умов.

Що стосується шумів у будівельній фізиці, то найпоширенішими є коливання вигину. Вони передаються по конструкційним елементам будівлі (стіни, перегородки, несучі пілони).

За спектральною структурою, шуми у звуковому діапазоні частот класифікуються на:

- Низькочастотний (< 400 Гц);
- Средньочастотний (400 - 1000 Гц);
- Високочастотний (> 1000 Гц).

Соціальні опитування проведені в декількох європейських країнах показали, що більша частина мешканців багатоповерхових будинків скаржаться на шум від сусідів. Згідно з Всесвітньою організацією охорони здоров'я (ВООЗ), здоров'я визначається як "стійкий стан фізичного, психічного та соціального благополуччя, та не обмежується лише відсутністю хвороб чи недоліків", див. [2]. Зважаючи на це визначення, вплив шуму на здоров'я людини слід розуміти не просто як несприятливий вплив, але також як порушення добробуту, тобто психологічний вплив шуму, який в довгостроковій перспективі може призвести до несприятливих фізичних наслідків. ВООЗ виявила значну кількість специфічних негативних наслідків для здоров'я, спричинених шумом навколишнього середовища, див. [3]. Окрім захворювань ми можемо також виокремити порушення сну, стрес тощо.

Актуальність проблеми звукоізоляції [3] показує ступінь серйозних розладів слуху в національних дослідженнях у трьох країнах ЄС, що становить приблизно третину від загальної кількості населення ЄС. Незважаючи на невизначеності, спричинені різними методологіями (включаючи анкети), що застосовуються для опитувань, автор [4] дійшов висновку, що проблема звукоізоляції у Європі є досить значною. У роботі [5] включено результати різних соціальних опитувань та описані недоліки через непослідовні анкети в різних країнах. Антропогенні шуми у житлових будівлях розглядалися у великому загальноєвропейському дослідженні LARES (Великий аналіз та огляд європейського житлового та

медичного стану), координованому ВООЗ (Європа). Дослідження WHO LARES охопило вісім європейських міст, і метою було оцінити вплив житлових умов на здоров'я. Результати можна знайти на веб-сайті ВООЗ [3].

При ранжуванні впливу з боку різних джерел шуму, дорожній рух є домінантним джерелом, за яким слідує антропогенний шум у житлових будівлях.

На підставі статистичних даних про населення [6] та результатів обстежень, що спричиняють подразнення шуму (див. [4]), виявилось, що понад 50 мільйонів європейців піддаються впливу шуму від сусідів, що негативно впливає на якість життя. Цитати з дослідження WHO LARES та більш докладні посилання наведені в [7].

1.1 Важливість розгляду питання звукоізоляції у приватному житлі

Боротьба з шумом у промислових, громадських та житлових приміщеннях, у містах та на транспортних об'єктах - важливе питання, до якого, на жаль, у наш час приділяють не достатньо уваги. До звукоізоляції відносяться спеціальні і додаткові конструкції, панелі, перекриття, перегородки особливого застосування. Їх використовують в проектуванні, будівництві, дизайні, реставрації та інших будівельних роботах. Шумозахист є важливим аспектом в архітектурі.

Шум – акустичні коливання, яким характерні зміна амплітуди і частоти. Шуми поділяються на повітряні (у газах), гідромеханічні (у рідинах), ударні (механічні на поверхні матеріалу за рахунок вібрацій). За частотою поділяють на низькочастотні (<400 Гц), середньочастотні (400—1000 Гц) та високочастотні (>1000 Гц). Процес боротьби з шумом називають шумозахистом – методи та засоби, спрямовані на зниження або максимальне придушення негативного впливу шуму.

Щоб розглянути житловий фонд у Європі на питання звукоізоляції, різних типів передачі звуку та частки мешканців, на яких впливає шум, корисно знати найпоширеніший тип житла, в кожній країні. Основні типи помешкань:

- Окреме житло (приватні будинки);
- Прибудований корпус (таунхаус, напівквартира);
- Квартири/кімнати ґрутожитків.

Частка населення, яке проживає у прибудованих будинках (таунхаусах у тому числі), коливається від 2% у Румунії до 61% у Нідерландах, у середньому 32%. На рисунку 1.1 зазначена порівняння між країнами Європи.

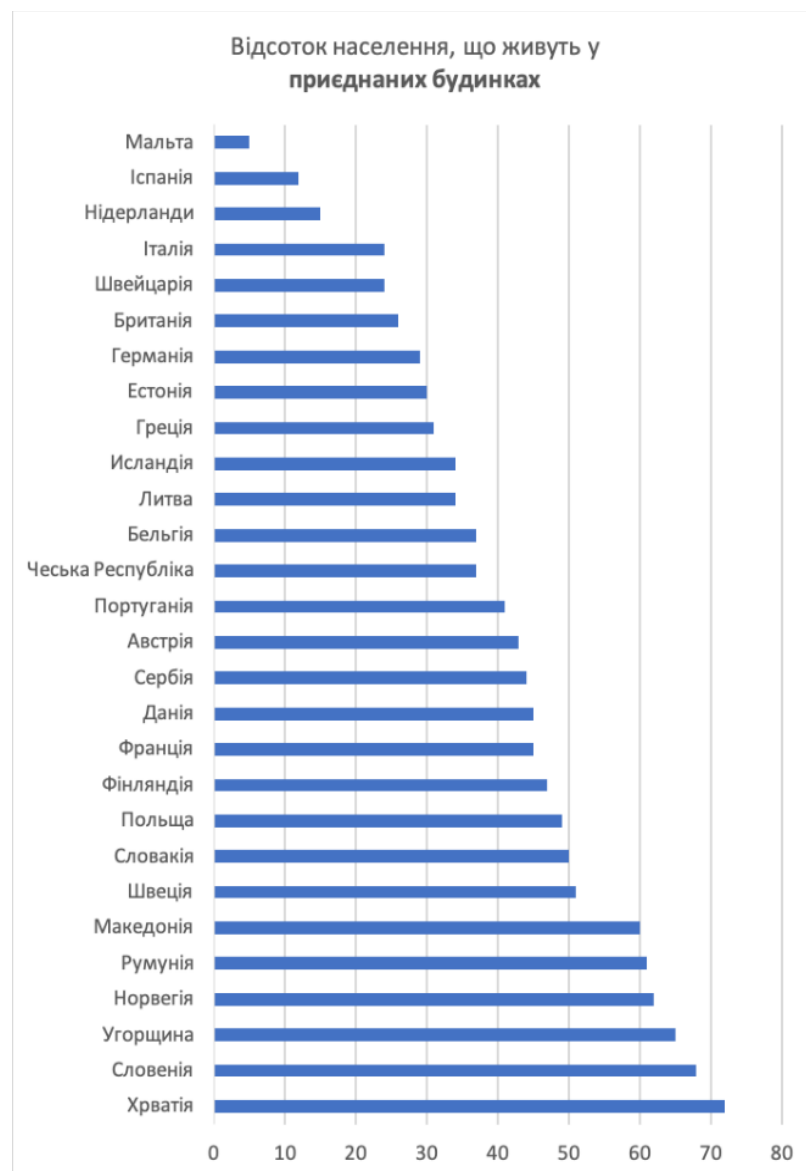


Рис. 1.1. Відсоток населення, що живуть у приєднаних будинках у Європі (данні 2013р.)

По різних даних в Україні відсоток населення, що живе у будівлях такого типу складає від 11% до 37%, в залежності від регіону. Не беруться до уваги села та селища міського типу, так як там переважають приватні будинки.

Класифікація сучасних конструкційних будівельних виробів для прибудованого житла в європейських країнах не є однозначною. Для цілей цієї публікації та для спрощення може бути прийнята наступна категоризація:

- На основі блоків - передбачає використання конструкцій на основі глини, кераміки, заповнювачів або силікату кальцію
- На основі деревини - за участю дерев'яного каркаса (відкрита та закрита панель), стовпа та бруса, поперечно-ламінованого бруса або масивних дерев'яних елементів та інженерних систем дерев'яних виробів, таких як конструкційні двотаврові балки або металеві балки.
- На сталевій основі - легкий сталевий каркас, високий сталевий каркас із композитними бетонними палубними системами
- На бетонній основі - бетону, збірних балок, плит та панелей, опалубки із бетонної ізоляції
- На гібридній основі - залучення робочих стін із брусом та брусовою підлогою, блокових робочих стін із дерев'яною підлогою, сталевих каркасів та панелей на основі деревини, бетону або сталевих каркасів з утепленою металевою обшивкою або несучими стінами.

Однак існують додаткові шляхи передачі звуку. Наприклад, конструкція несучої стіни може бути однаковою на всю її висоту (від фундаменту до даху). Оскільки несуча стіна може бути конструктивно з'єднана з фундаментами, підлогами, внутрішніми стінами, дахом та зовнішніми стінами, кожен із цих стиків та їх фізичний склад впливає на звукоізоляційні властивості всієї конструкції. Звук, який здатний передаватися між будинками на цих «стиках», зазвичай називають непрямою передачею звуку. Це часто може мати вагомий вплив на загальні показники звукоізоляції.

Таким чином, показники звукоізоляції стіни між двома прибудованими будинками можуть змінюватися на кожному рівні підлоги внаслідок різних конструкційних стиків, використовуваних будівельних матеріалів та прямих або не прямих шляхів, як показано на рис. 1.2.

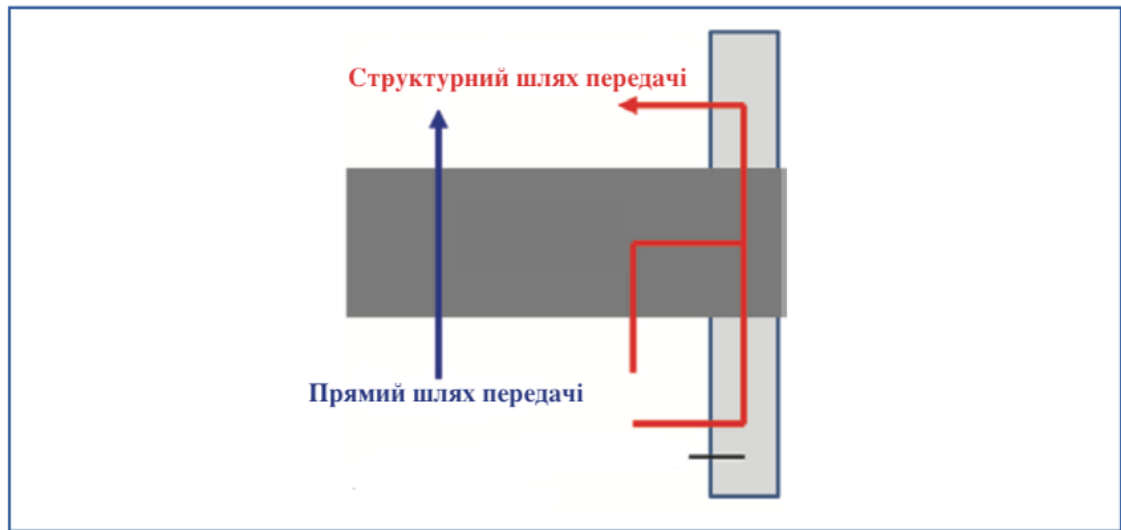


Рис. 1.2 Шляхи передачі шуму

1.2 Типи шумів та шляхи передачі звуку в житлі

Шлях для вирішення конкретних технологічних проблем - залежить від типу шуму, функціонального призначення будівель та експлуатаційних вимог. В умовах багатоквартирних будинків перегородки та несучі стіни є лише умовним бар'єром для поширення звукових хвиль. Тому, щоб усунути шум і не турбувати сусідів - потрібно провести якісну звукоізоляцію.

Спочатку потрібно визначитися з типом шуму, який впливає. Вони поділяються на три загальні групи:

Повітряний шум - поширюється по повітрю. Якщо на шляху звукової хвилі виникає бар'єр у вигляді стін, перегородок чи стелі, то він не виходить, але викликає в них коливання. Вони передаються частинкам повітря в сусідні приміщення, тому ми чуємо звуки. Прикладами такого шуму можуть бути

гучний приймач, розмови сусідів, плач дитини тощо. Якісний звукоізоляційний матеріал здатний пригнічувати вібрації, допомагаючи усунути проблему;[8]

Ударний шум - виникає під час механічного впливу на конструкцію. Це може бути перестановка меблів, падіння предметів на підлогу, удари та багато іншого. Тоді шумоізоляцію потрібно виконувати на підлозі та стелі;

Структурний шум - в цьому випадку звуки поширюються по будівельних конструкціях. Найважче позбутися саме таких шумів, тут допоможе лише повна звукоізоляція всієї помешкання.[8]

Також є повна та локальна звукоізоляція. Останній метод передбачає ізоляцію від шуму особливо слабких точок.

У таунхаусах, які дуже популярні в передмістях великих міст України, кожна кімната має роздільні стіни, а для квартир будуть відокремлені стіни та підлоги.

Термін «роздільна стіна», розділяє два окремі будинки. Будинок із середньою терасою розділяє стіни з двома сусідніми будинками. Квартира може розділяти одну або дві роздільні стіни із сусідніми житлами, але також може мати роздільну стіну до загального громадського залу або під'їзду до спільних сходів.

1.3 Засоби та матеріали звукоізоляції, віброізоляції

У сучасному будівництві найбільш популярними та поширеними є такі види звукоізоляційних матеріалів, згідно загальноприйнятої класифікації:

- Мінеральна вата;
- Пінопласт;
- В'язкі мембрани
- Сендвіч панелі
- Натуральна пробка
- Целюлозні матеріали
- Скловолокно

- Гумові матеріали
- Звукоізоляційне облицювання

Кожен з них вартий детального огляду, оскільки має ряд переваг та обмежень.[9]

1.3.1 Мінеральна вата

Одним з найпоширеніших матеріалів сьогодні є мінеральна вата. Вона чудово поглинає звуки - як ударні, так і повітряні. Ці характеристики дозволяють бути найпопулярнішим матеріалом для цих цілей. Для роботи застосовуються спеціальні плити або килимки з акустичної мінеральної вати.

Такі вироби характеризуються високим рівнем звукоізоляції, що досягається завдяки спеціальному розташуванню волокон. Структура створює повітряні порожнини, які чудово гасять звукову енергію. Завдяки цьому мінеральна вата володіє звукоізоляційною-звукопоглинальною здатністю, при цьому характеризується низькою динамічною жорсткістю. Дуже важливим показником ефективності звукоізоляції є коефіцієнт звукопоглинання A_p , який залежить від того, чи вата розташована впритул до існуючої будівельної конструкції чи відокремлена від неї повітряним простором, а також чи є зверху облицювальні матеріали. Крім того, коефіцієнт звукопоглинання A_p залежить від товщини матеріалу. Як правило, він становить від 0,75 до 1.

Вплив наявності вати в конструкції звукоізоляційних облицювань вивчав Гомпертс [26]. У своїй роботі [26] він описав залежність наявності шару звукопоглинання у перегородках з обшивками з гіпса.

Також мінеральна вата в різних оформленнях (акустичні острови, басові пастки, панелі тощо) виконують роль звукопоглиначів. Цей метод використання дозволяє знизити шум у контрольних точках приміщення, якщо джерело шуму знаходиться в приміщенні. Суть цього методу полягає в зниженні звукової енергії, яка відбивається від поверхонь та переноситься до точки вимірювання.

Розрахункова ефективність цього методу сягає 10дБ, але на практиці можливо знизити шум до 5дБ.

1.3.2 Пінопласт

Пінопласт - другий за популярністю матеріал для цих цілей. Однак він здатний поглинати лише звуки ударного походження. Але незважаючи на це, матеріал надзвичайно поширений. У зв'язку з такими специфічними параметрами пінополістирол використовується в основному для забезпечення утеплення підлог та стелі. Якщо його покласти на підлогу, його можна стиснути, заливши бетонну стяжку товщиною 3-6 см.

Армування стяжки дає змогу захистити її від розтріскування внаслідок рухів по деформованій основі - під впливом такого навантаження висота матеріалу зменшується на 2-4 мм, гранули стискаються, забезпечуючи ефективне придушення ударного шуму в діапазоні 25–33 дБ.[9]

Потрібно класти матеріал рівномірно, близько один до одного. Шви зміщуються на половину довжини пластини, а шви по краю зазвичай виготовляються з того ж матеріалу. Перед заливкою стяжки на основу пінополістиролу укладається відокремлювальний шар плівкового матеріалу або покрівельного матеріалу, задля гідроізоляції та захисту демпфуючого шару від утворення мостиків шуму. Для звукоізоляції ідеально підійдуть плити невеликої товщини - до 4 см.[9]

1.3.3 Матеріали мембранного типу

Що стосується в'язкопружних мембран, вони також є дуже ефективним матеріалом для звукоізоляції. Вони використовуються, як правило, для підвищення захисту каркасних стін від сторонніх звуків. Також в'язкопружні мембрани також використовуються для:

- Стін;
- Стель;

- Підлог;
- Крівель;

Вони являють собою синтетичні звукоізоляційні матеріали високої щільності, виготовлені з полімерів, без використання бітумінозних смол і гуми. Вони характеризуються високими показниками еластичності, гнучкості, міцності, довговічності та вогнестійкості. Вони також використовуються як вібраційні демпфуючі середні шари для підвищення звукоізоляції стін каркасу та запобігання виникненню резонансних ефектів. В'язкопружна мембрана наклеюється на листи гіпсокартону з внутрішньої сторони опорної рами. Використання таких матеріалів дозволяє підвищити захист від сторонніх звуків на 25-32 дБ. Також Крейтан В.Г. у своїй роботі «Забезпечення звукоізоляції під час конструювання житлових будівель» описав залежність додаткової маси облицювань у конструкціях з гіпсокартонних плит. У роботі зазначений позитивний вплив наявності мембран у облицюваннях вищезазначених типів.

1.3.4 Листові матеріали та конструкції

Останнім часом сендвіч-панелі стали набувати великої популярності на ринку звукоізоляційних матеріалів. Вони можуть бути абсолютно різними за довжиною і складом, використовуються, як правило, для звукоізоляції одношарових перегородок. Сьогодні все частіше для створення додаткового захисту одношарових перегородок (наприклад, цегляних стін) від звукових хвиль почали використовувати готові звукоізоляційні системи. Це сендвіч-панелі різної товщини, які складаються з поєднання матеріалів різної щільності та структурних характеристик. До переваг їх використання можна віднести відсутність необхідності встановлення металевого каркаса - вони кріпляться безпосередньо до стін.

Один з найпопулярніших варіантів - поєднання щільного шару (гіпсоволокнистий лист) і легкого (мінеральна вата) - товщина і структура матеріалів можуть змінюватися. В цілому отримуємо систему «маса-пружина-

маса». Вони монтуються за допомогою вібростійких матеріалів через спеціальні вузли, виготовлені виробником. Товщина таких панелей може бути від 40 до 150 мм, і вибирається виходячи з товщини несучої перегородки. Підвищення показника звукоізоляції залежить від щільності і може становити від 10 до 20 дБ.

1.4 Засоби звукоізоляції.

Під засобами звукоізоляції мається на увазі будівельні конструкції (огородження), які використовуються для зниження шуму, який розповсюджується між приміщеннями та/або навколишнім середовищем. Процес зниження шуму обумовлений поглинанням та відбиттям звукової енергії будівельною конструкцією (перегородками, перекриттями).

В архітектурній акустиці, при розрахунках, розглядають декілька видів конструкцій [21]:

- однорідні масивні перегородки (цегляна стіна, панельні бетонні стіни, тощо.)
- перегородки із листових матеріалів (ГКЛ, ГВЛ, ДСП, тощо.)
- перегородки на основі металевого каркасу, з обшивкою листовими матеріалами чи без, з заповненням повітряного проміжку пористим звукопоглинальним матеріалом.

Прийнято розраховувати звукоізоляцію таких конструкцій графічним методом. Приклад орієнтовних частотних характеристик звукоізоляції наведених вище конструкцій наведено на рис. 3

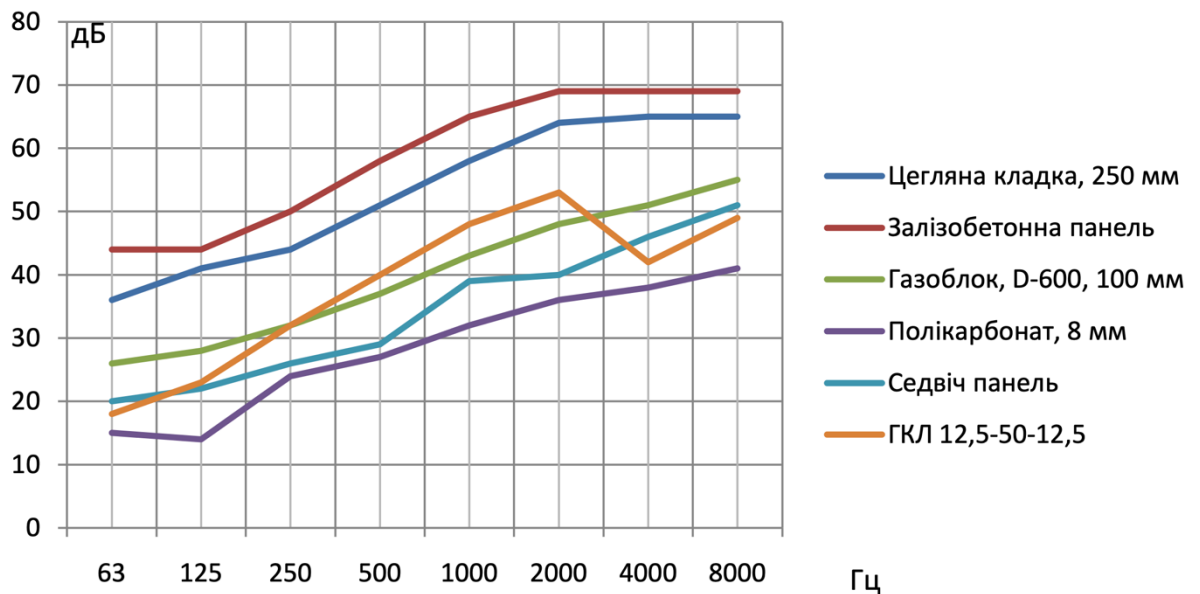


Рис. 1.3. - Амплітудно частотні характеристики звукоізоляції огорожувальних конструкцій з різних матеріалів.

З рисунку 1.3 можна помітити, що масивні однорідні конструкції мають велику перевагу перед іншими наведеними матеріалами, особлива на низьких частотах. Це зумовлено великою масою даних конструкцій.

1.5 Засоби віброізоляції

Засоби віброізоляції направлені на зниження ударного або структурного шуму (прямий фізичний вплив на будівельні конструкції з рис. 2) найчастіше використовують для зниження шуму від інженерного обладнання (ТП, насоси, вентиляційне обладнання тощо). Такий спосіб полягає у використанні вібророзв'язуючих елементів таких як: віброізолюючі вставки або віброкріплення. Основна проблема вібраційного шуму в тому, що механічні коливання конструкції, які виникають в наслідок прямого впливу на стіни/підлоги/стелі, призводять до повторного випромінювання шуму в приміщення.

В наш час використовують різні види віброізоляторів, які окремо підбираються під поставлені задачі та від робочої частоти устаткування. Найпоширеніші в наш час:

- Пружинні віброізолятори (рис. 1.4)
- Полімерні віброізолятори (рис. 1.5)
- Плаваючі підлоги

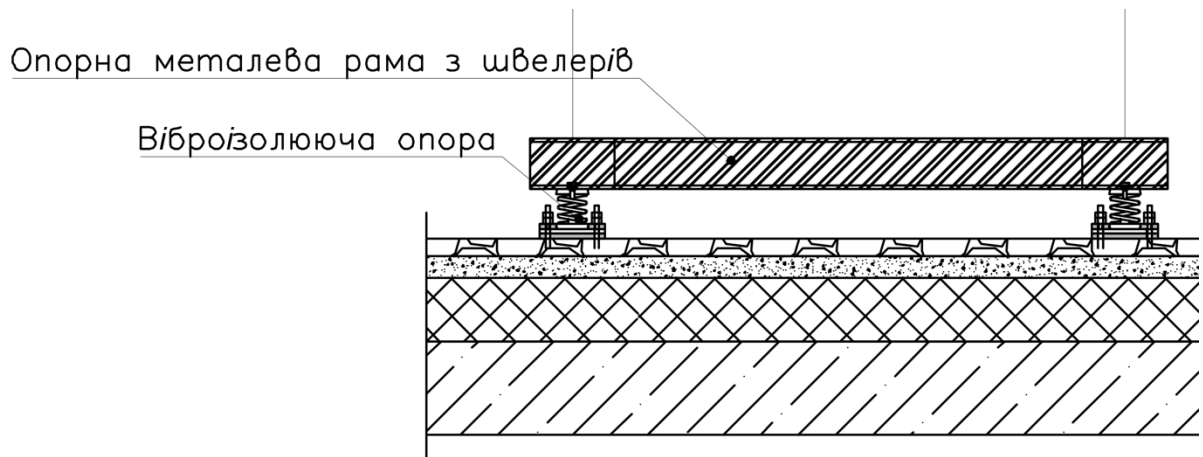


Рис. 1.4 Приклад віброізоляції зовнішніх блоків системи вентиляції

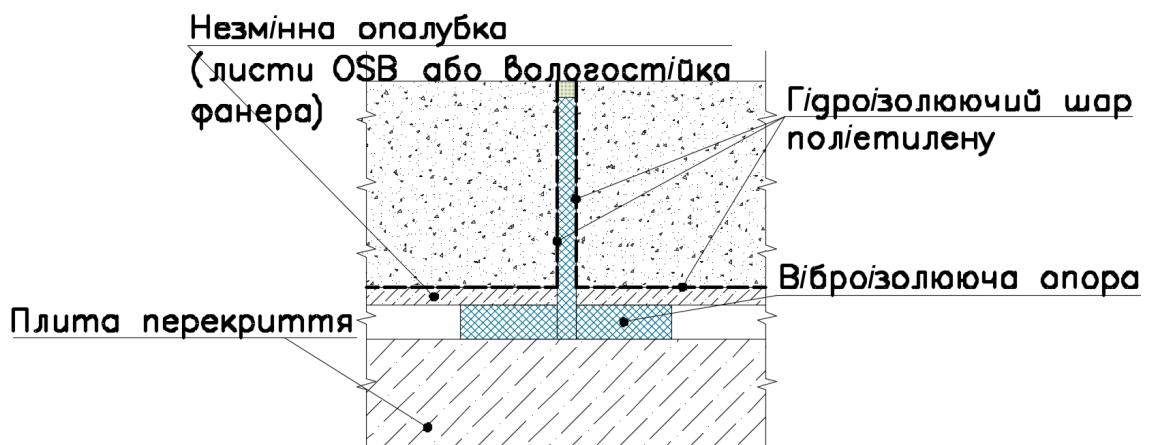


Рис. 1.5 Вузол сполучення віброізольованих бетонних фундаментів

На рисунку 1.6 наведений приклад використання віброізоляторів при будівництві театру м. Гонког, Китай. Обмеження простору змусило

розташувати приміщення залів театру над рівнем землі, щоб виключити жорсткі з'єднання залів між собою. Таким чином, два зали підняті та розташовані в шаховому порядку всередині масиву будівлі та розділені, щоб гарантувати звукову та акустичну ізоляцію. Рішення, яке було знайдено для захисту будівлі та всіх залів і сценічних майданчиків усередині від вібрації та шуму, полягало в тому, щоб розмістити всю будівлю на понад 650 віброізоляційних пружинах. Це дає змогу відокремити комплекс від будь-якого шуму та вібрації підвалу та рівня землі, спричиненого тунелем метро, рухом транспорту чи сусідніми підземними комунікаціями.

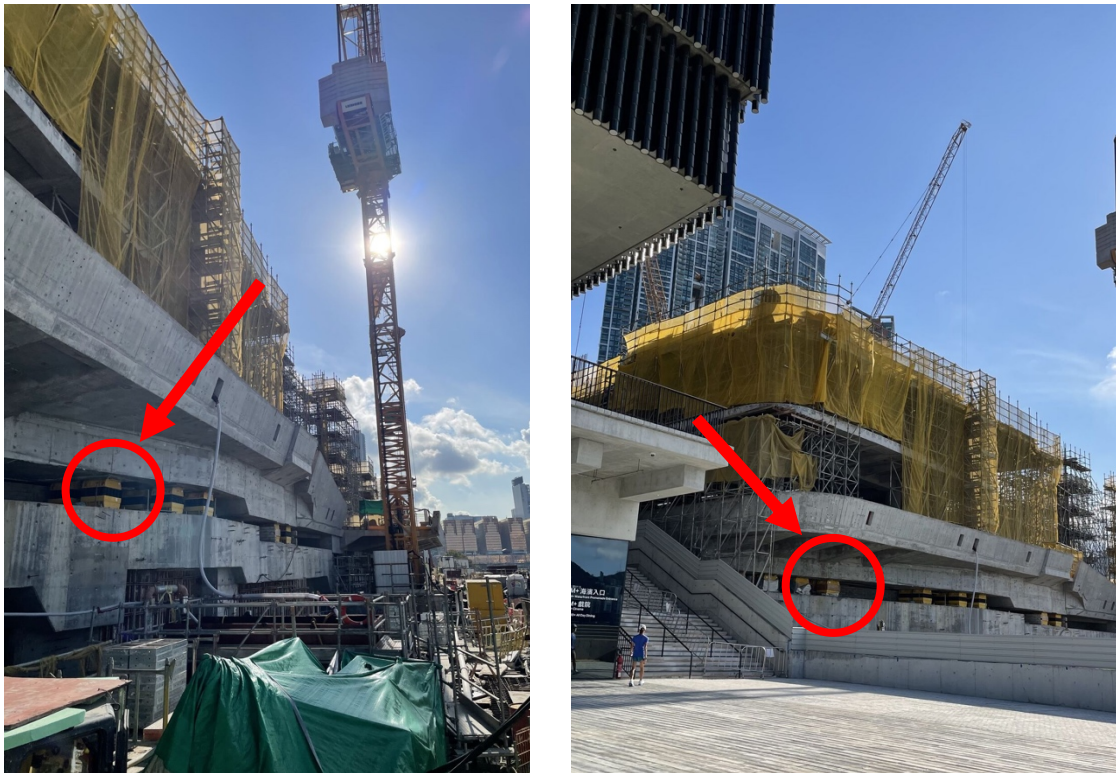


Рис. 1.6 Приклад використання віброізоляторів в приміщенні театру, для захисту від вібрацій метро, м. Гонгконг, Китай

Важливо знати акустичні втрати при передачі звуку або шуму через стіни і підлоги, щоб мати можливість порівняти різні конструкції. Це дає змогу розрахувати акустичну ізоляцію між квартирами або вплив шуму від зовнішніх джерел, таких як транспорт, інженерне обладнання, тощо, і розробити оптимальні рішення щодо контролю шуму. Вже існує багато лабораторних розрахунків для різних типів перегородок, але не доцільно

робити натурні експерименти для всіх існуючих та використовуваних типів конструкцій, тому важливо мати методи для розрахунку та прогнозування індексів звукоізоляції типовими будівельними конструкціями.

1.6 Чинні методи розрахунку звукоізоляції

З конструктивної точки зору перегородки можна розділити на два класи: одношарові та багатошарові.

Під одношаровими конструкціями розуміють використання будь-якого щільного будівельного матеріалу на жорсткому сполученні (розчині). Це можуть бути цегляні, гіпсові, газоблочні, керамзитобетонні і навіть залізобетонні перегородки, де бетон грає роль і конструктивного матеріалу, і сполучного. Незважаючи на те, що в одній перегородці можлива комбінація декількох матеріалів, визначальним буде наявність лише щільних матеріалів за умови жорстких зв'язків між усіма елементами конструкції. Наприклад, стіна з газобетонних блоків на цементно-піщаному розчині, облицьована цеглою.

Звукоізоляційні характеристики аналогічних конструкцій визначаються переважно залежно від їх маси та підвищення (підсилення) індексу звукоізоляції. Приблизно 6 дБ збільшення індексу звукоізоляції відбувається за умови подвоєння маси конструкції. Пористість матеріалу перегородки також відіграє роль у забезпеченні її звукоізоляційних властивостей. Проте, практика показує, що важко досягти результату шляхом збільшення пористості матеріалу через значні втрати звукоізоляції, що виникають разом із зменшенням поверхневої густини такого матеріалу.

Перегородки з багатьма шарами, як вказує їх назва, складаються з декількох (принаймні двох) шарів будівельних матеріалів, які можуть бути твердими (густими) або легкими. Тверді матеріали (такі як гіпсокартон, цегла, метал) відіграють роль у звукоізоляції і функціонують аналогічно

одношаровим перегородкам: звукоізоляція буде вищою, якщо поверхнева щільність матеріалу більша. Легкі матеріали виконують функцію поглинання звуку. Отже, структура має бути такою, щоб звукові коливання, які проходять через неї, зменшувалися за рахунок тертя повітря в порах матеріалу.

Слід зауважити, що застосування матеріалів, таких як пінопласт, пінополіуретан або корок, виявляється менш ефективним у звукоізоляційних перегородках. Це пояснюється тим, що для досягнення звукоізоляції ці матеріали мають недостатню щільність, і їх не можна вважати звукопоглинальними через низьку здатність поглинати звук через відсутність повітропроникності. Достатньо популярним рішенням такого типу в Україні є конструкція виду: металевий каркас заповнений мінеральною ватою та обшитий з обох боків листами гіпсокартону, по два з кожного боку.

1.6.1 Звукоізоляція листових матеріалів (тонких перегородок)

Наведений метод можна використовувати для конструкцій, що складаються з одного шару (бетон, цегла, газобетон, керамічні блоки тощо) та мають поверхневу густину $100-1000 \text{ кг/м}^2$. Частотну характеристику ізоляції повітряного шуму R , дБ, одношаровою огорожувальною конструкцією визначають шляхом побудови кривої, зображуючи її як ламану лінію, аналогічну лінії ABCD, яка вказана на рисунку 5.

Координати точок B і C (R_B, R_C і частоти f_B і f_C) визначають відповідно згідно з таблицею 1. Частоти з табл. 1 f_B і f_C заокруглюють до середньгеометричної частоти тієї третиннооктавної смуги, в межах якої знаходиться частота f_B або f_C [18]

Відрізок AB будують з нахилом 4,5 дБ на октаву, а відрізок CD – з нахилом 7,5 дБ на октаву (рис. 1.5). В деяких джерелах вказаний нахил 4 дБ на октаву та на 8 дБ на октаву відповідно [17]. Точки B і C з'єднують між собою.

Графік ABCD на рисунку 1.7 і є побудована частотна характеристика ізоляції повітряного шуму R , дБ, одношаровою огорожувальною конструкцією із листових матеріалів.

R , дБ

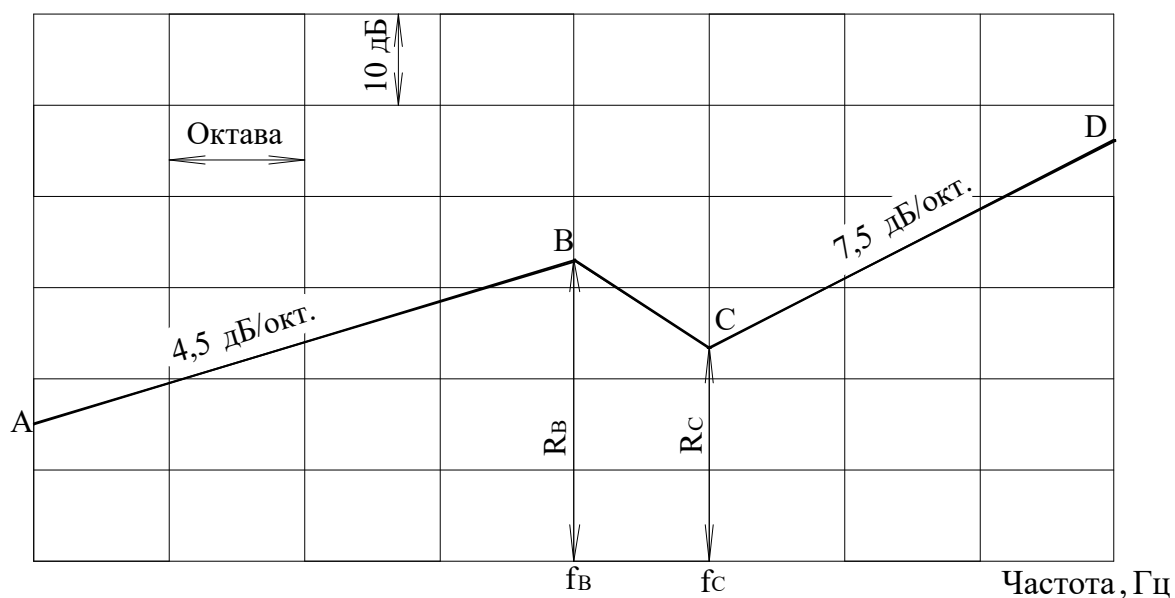


Рис. 1.7– Частотна характеристика ізоляції повітряного шуму одношаровою огорожувальною конструкцією[17]

Таблиця 1.1 – Визначення координат точок В і С [19] [20]

| Матеріал | Густина ρ , кг/м ³ | f_B , Гц | f_C , Гц | R_B , дБ | R_C , дБ |
|---|---------------------------------------|------------|------------|------------|------------|
| 1 Сталь | 7800 | 6000/ h | 12000/ h | 40 | 32 |
| 2 Алюмінієві сплави | 2500-2700 | 6000/ h | 12000/ h | 32 | 22 |
| 3 Скло силікатне | 2500 | 6000/ h | 12000/ h | 35 | 29 |
| 4 Скло органічне | 1200 | 17000/ h | 34000/ h | 37 | 30 |
| 5 Азбестоцементні плити | 2100 | 9000/ h | 18000/ h | 35 | 29 |
| | 1800 | 9000/ h | 18000/ h | 34 | 28 |
| | 1600 | 10000/ h | 20000/ h | 34 | 28 |
| 6 Гіпсокартонні плити | 1100 | 19000/ h | 38000/ h | 36 | 30 |
| | 850 | 19000/ h | 38000/ h | 34 | 28 |
| 7 Деревностружкові плити | 850 | 13000/ h | 26000/ h | 32 | 27 |
| | 650 | 13500/ h | 27000/ h | 30 | 26 |
| 8 Тверді деревно-волокнисті плити | 1100 | 19000/ h | 38000/ h | 35 | 29 |
| Примітка. h – товщина одношарової тонкої конструкції (листа) у міліметрах. | | | | | |

1.6.2 Звукоізоляція однорідних масивних огорожень

Частотну характеристику звукоізоляції монолітних конструкцій визначають почастотно за наступними вказівками. Частотну характеристику R , дБ визначають у графічний спосіб, будуючи криву ACBD як наведено на рисунку 1.8.

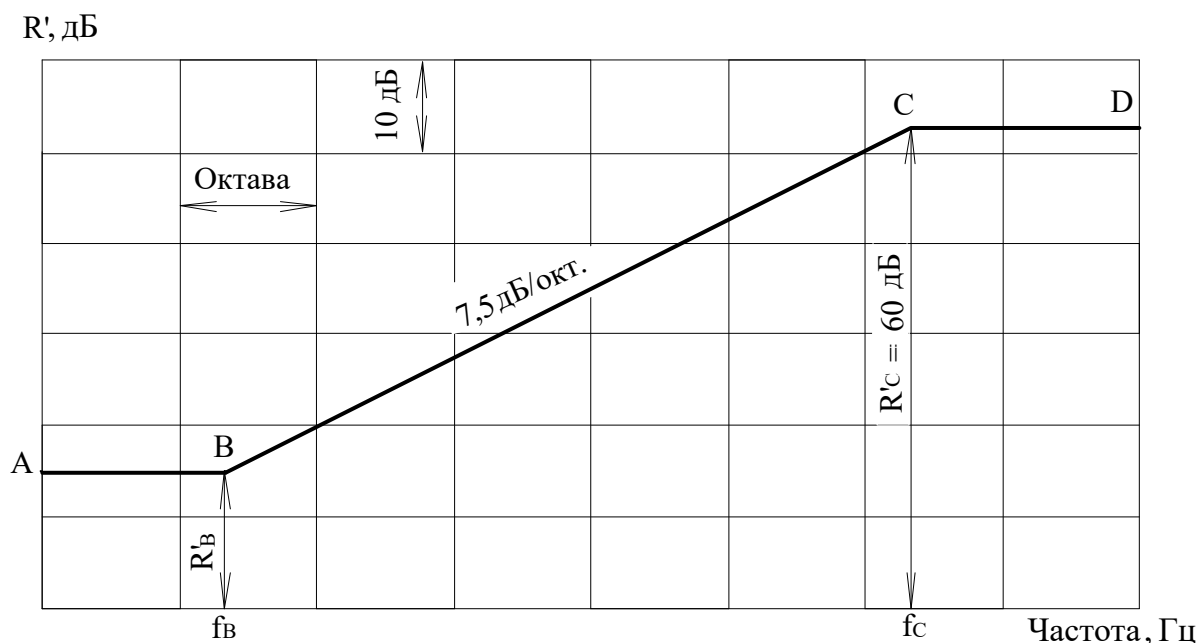


Рис. 1.8 Частотна характеристика ізоляції повітряного шуму акустично однорідною огорожувальною конструкцією

Частоту f_B (абсцису точки В) визначають згідно з 1.1.а-1.1.ж при враховуючи товщину конструкції:

$$f_B = 164 - 120 \lg h_n \quad \text{при} \quad \rho \geq 1800 \text{ кг/м}^3, \quad (1.1.а)$$

$$f_B = 159 - 120 \lg h_n \quad \text{при} \quad \rho = 1700 \text{ кг/м}^3, \quad (1.1.б)$$

$$f_B = 154 - 120 \lg h_n \quad \text{при} \quad \rho = 1600 \text{ кг/м}^3, \quad (1.1.в)$$

$$f_B = 149 - 120 \lg h_n \quad \text{при} \quad \rho = 1500 \text{ кг/м}^3, \quad (1.1.г)$$

$$f_B = 144 - 120 \lg h_n \quad \text{при} \quad \rho = 1400 \text{ кг/м}^3, \quad (1.1.д)$$

$$f_B = 139 - 120 \lg h_n \quad \text{при} \quad \rho = 1300 \text{ кг/м}^3, \quad (1.1.е)$$

$$f_B = 134 - 120 \lg h_n \quad \text{при} \quad \rho \leq 1200 \text{ кг/м}^3, \quad (1.1.ж)$$

де h_n – товщина огорожувальної конструкції, м;

ρ – густина (об'ємна маса) матеріалу конструкції, кг/м³.

Отримане значення заокруглюють до середньгеометричної частоти третиннооктавної смуги частот.

Ординату точки В, яка є величиною звукоізоляції R'_B , дБ, визначають за формулою:

$$R'_B = 21 \lg m - 14, \quad (1.2)$$

де m – поверхнева густина огорожувальної конструкції, кг/м².

Отриману величину R'_B заокруглюють до 0,5 дБ.

Далі від точки В ліворуч проводять горизонтальну криву ВА, а праворуч від точки В проводять криву ВС з нахилом 7,5 дБ на октаву до точки С з ординатою $R'_C = 60$ дБ. Із точки С праворуч проводять горизонтальну криву CD. Якщо точка С лежить за межами нормованого частотного діапазону звукоізоляції (частота $f_C \geq 3150$ Гц), то відрізок CD - відсутній.

Така методика використовуються для розрахунку звукоізоляції в Україні. Нижче наведені порівняння використання такої методики із натурними вимірюваннями. Нижче (рис. 1.9-1.12) наведено приклади розрахунку та порівняння з натурними експериментами. Вимірювання проводилося шумоміром Brüel & Kjær (Данія) модель 1613, свідоцтво про повірку № 22-01/2571/16 чинне до 20 липня 2023р. Об'єктами були реальні квартири, в яких проводилися будівельні роботи по збільшенню рівня звукоізоляції міжквартирних перегородок. Експерименти проводилися у період з 2020-2022 роки на різних об'єктах.

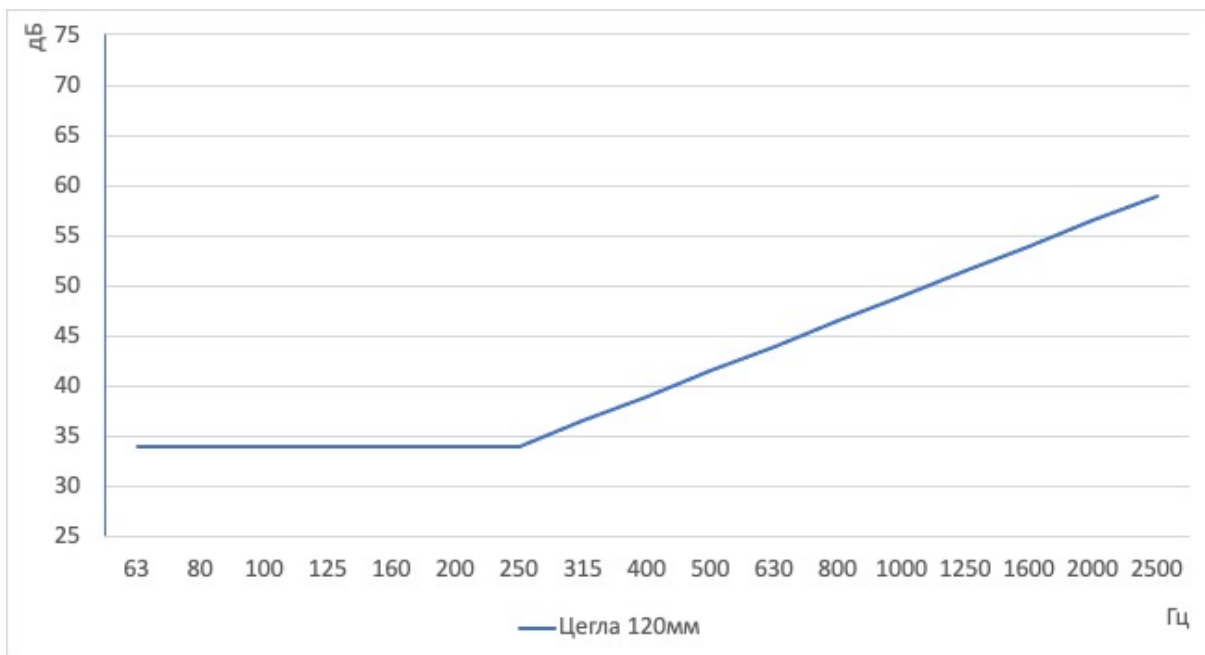


Рис. 1.9 Частотна характеристика ізоляції повітряного шуму огорожувальною конструкцією з цегли 120мм, розрахованою за методикою наведеною вище

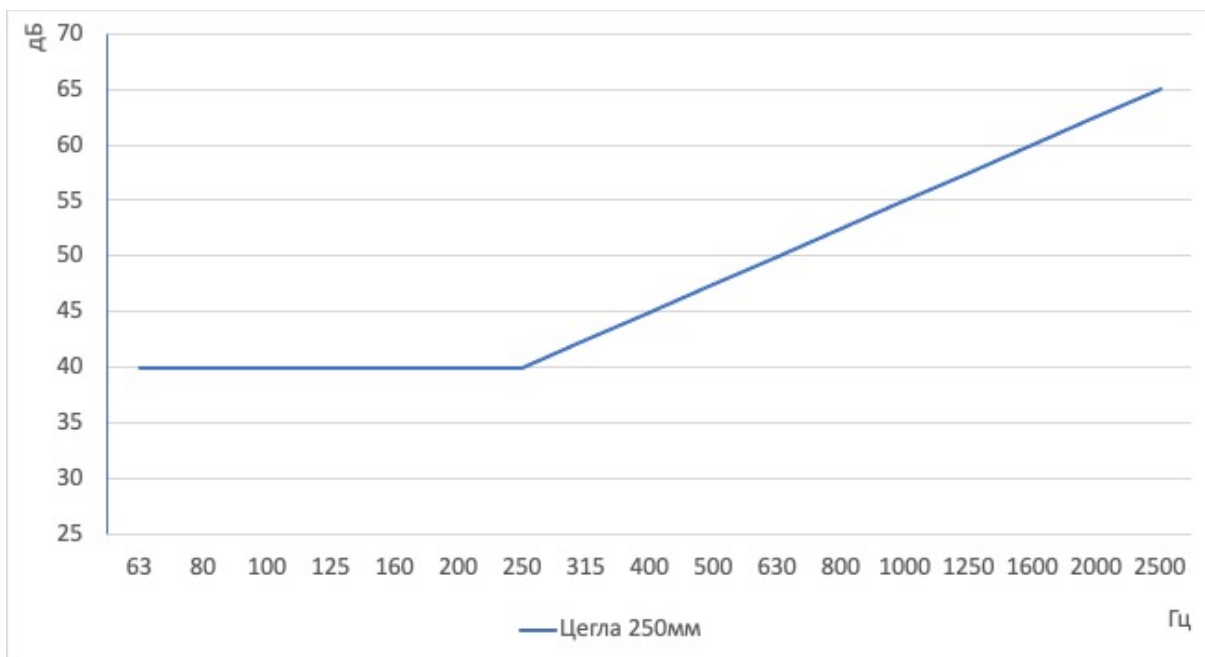


Рис. 1.10 Частотна характеристика ізоляції повітряного шуму огорожувальною конструкцією з цегли 250мм, розрахованою за методикою наведеною вище

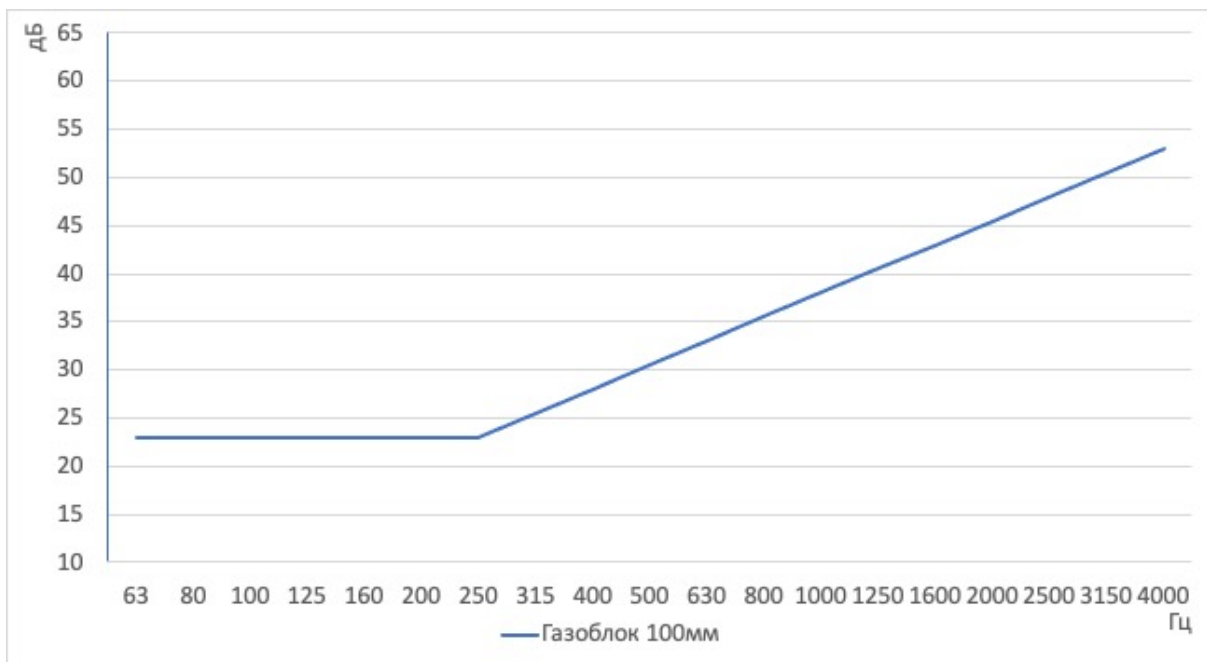


Рис. 1.11 Частотна характеристика ізоляції повітряного шуму огорожувальною конструкцією з газоблоку 100мм, розрахованою за методикою наведеною вище

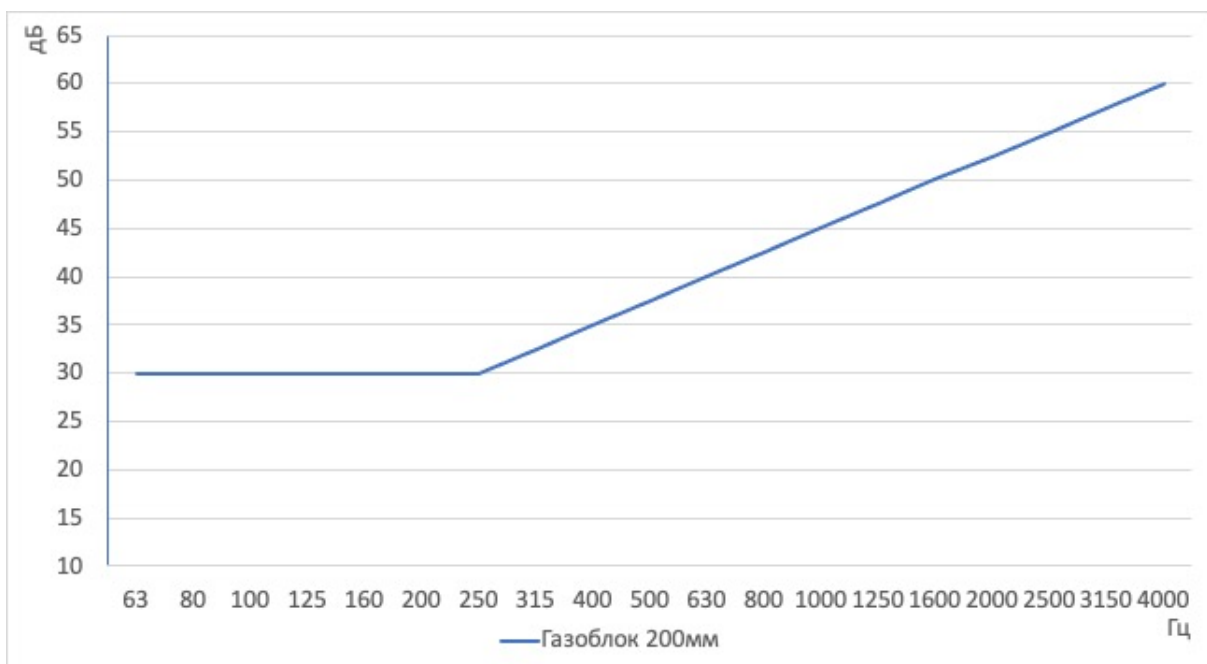


Рис. 1.12 Частотна характеристика ізоляції повітряного шуму огорожувальною конструкцією з газоблоку 200мм, розрахованою за методикою наведеною вище

1.6.3 Розрахунок ізоляції повітряного шуму багатошаровими огорожувальними конструкціями

Частотну характеристику ізоляції повітряного шуму огорожувальною конструкцією, яка складається із двох тонких листів з повітряним проміжком між ними (подвійне скління, каркасно-обшивні перегородки із двох обшивок з одинарних гіпсокартонних, гіпсоволокнистих листів, деревноволокнистих і деревностружкових плит, металу тощо по каркасу із металевого профілю або дерев'яних брусків) при однаковій товщині листів будують за наступним алгоритмом:[20]

- будують частотну характеристику ізоляції повітряного шуму однією обшивкою за алгоритмом зазначеним у попередньому розділі наведеному вище. Наступним кроком буде побудова допоміжної ламаної $A_1B_1C_1D_1$. До ординат лінії $ABCD$ додають поправку ΔR_1 , дБ, яка відповідає за збільшення поверхневої густини конструкції. Поправку ΔR_1 визначають згідно таблиці 2. Матеріал каркасу (металевий чи дерев'яний) перегородки при визначенні величини $m_{\text{сум}}$ не враховується;[19]
- визначають частоту резонансу f_p конструкції за наступною формулою:

$$f_p = 60 \sqrt{\frac{m_1 + m_2}{d_{\Pi} m_1 m_2}}, \quad (1.3)[19]$$

де m_1 і m_2 —поверхнева густина обшивок, кг/м² ;

d_{Π} — ширина повітряного проміжку між обшивками, м.

Розрахункова частота округлюється до найближчої значущої середньгеометричної частоти в третиннооктавному діапазоні, в якому знаходиться вказана частота. До моменту досягнення даної частоти, частотна характеристика звукоізоляції вивченої конструкції співпадає з допоміжною лінією $A_1B_1C_1D_1$ (відображена крива A_1E на рисунку 1.13). При досягненні частоти , значення звукоізоляції зменшується на 4 дБ відносно кривої

$A_1B_1C_1D_1$ (означене точкою F). Точки E та F з'єднують між собою для подальших розрахунків.

- на частоті $8f_p$ (на три октави вище від частоти резонансу) визначають точку K з ординатою $R_K = R_F + H_{II}$, дБ, яку з'єднують з точкою F. Величину поправки H_{II} , дБ, визначають відповідно до таблиці 3 в залежності від товщини повітряного проміжку d_{II} . Від точки K проводять відрізок KL з нахилом 4,5 дБ на октаву до точки f_B (паралельно лінії A_1B_1)[14].

Значення ординати відрізка KL над ординатою допоміжної кривої $A_1B_1C_1D_1$ являє собою поправку ΔR_2 , дБ, поправка враховує наявність повітряного проміжку (для діапазону частот вище від $8f_p$). Якщо $f_B = 8f_p$, точки K і L приймаються за одну. Якщо $f_B < 8f_p$, відрізок FK проводять тільки до точки L, яка відповідає частоті f_B . Поправку ΔR_2 у цьому випадку визначають як різницю ординат точки L і лінії A_1B_1 на частоті f_B . Точка K в даному випадку є допоміжною;

г) від точки L до частоти $1,25f_B$ проводять відрізок LM. На частоті f_C визначають точку N шляхом додавання до величини ординати допоміжної кривої $A_1B_1C_1D_1$ поправки ΔR_2 (тобто, $R_N = R_C + \Delta R_1 + \Delta R_2$) і з'єднують її з точкою M. Від точки N проводять відрізок NP з нахилом 7,5 дБ на октаву, в деяких джерелах 9дБ на октаву[17].

Крива $A_1EFKLMNP$ на рисунку 1.13 являє собою частотну характеристику ізоляції повітряного шуму R , дБ, досліджуваною огорожувальною конструкцією.

Аналогічно будують частотну характеристику ізоляції повітряного шуму світлопрозорими (скляними) конструкціями з подвійним склінням при однаковій товщині шарів скла. При побудові частотної характеристики звукоізоляції вікон, віконні рами, при визначенні величини $m_{\text{сум}}$, не враховують.

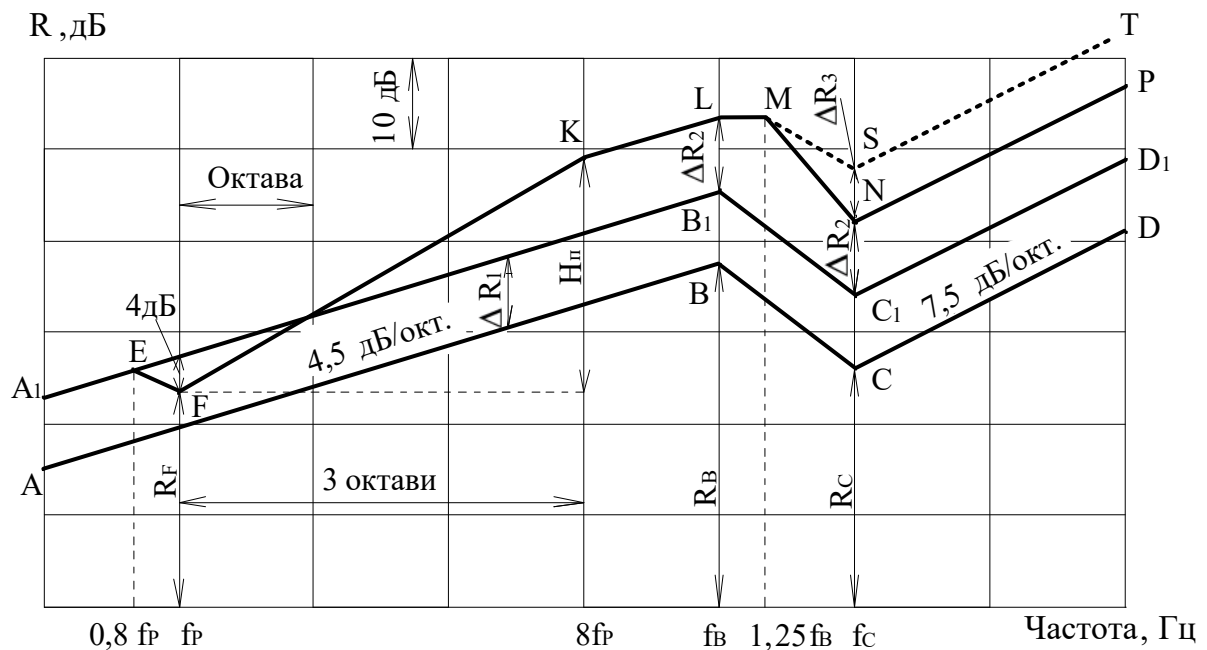


Рис. 1.13—Частотна характеристика ізоляції повітряного шуму конструкцією, яка складається із двох тонких одинарних листів (обшивок) однакової товщини з повітряним проміжком між ними[17].

Якщо каркасно-обшивна перегородка (наприклад, із гіпсокартонних листів) складається із двох тонких листів з повітряним проміжком між ними, але обшивки складаються із двох не склеєних між собою листів однакової товщини, її частотну характеристику ізоляції повітряного шуму будують згідно з рис. 1.13. При цьому величини R_B , R_C , f_B і f_C кривої ABCD визначають для одинарного листа обшивок. Поправку ΔR_1 , на збільшення поверхневої густини конструкції в цілому, визначають відповідно до таблиці 1.2 в залежності від величини відношення $m_{\text{сум}}/m_1$ (де $m_{\text{сум}}$ — сумарна поверхнева густина обох обшивок перегородки без урахування каркасу, $\text{кг}/\text{м}^2$; m_1 — поверхнева густина одного листа, $\text{кг}/\text{м}^2$) [20]. Резонансну частоту f_p конструкції визначають згідно з формулою (1), в якій m_1 і m_2 — сумарна поверхнева густина відповідно кожної із обшивок.

Таблиця 1.2 – Величина поправки ΔR_1 [19]

| $m_{\text{сум}}/m_1$ | ΔR_1 , дБ | $m_{\text{сум}}/m_1$ | ΔR_1 , дБ |
|----------------------|-------------------|----------------------|-------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| 1,4 | 2,0 | 2,7 | 6,5 |
| 1,5 | 2,5 | 2,9 | 7,0 |
| 1,6 | 3,0 | 3,1 | 7,5 |
| 1,7 | 3,5 | 3,4 | 8,0 |
| 1,8 | 4,0 | 3,7 | 8,5 |
| 2,0 | 4,5 | 4,0 | 9,0 |
| 2,2 | 5,0 | 4,3 | 9,5 |
| 2,3 | 5,5 | 4,6 | 10,0 |
| 2,5 | 6,0 | 5,0 | 10,5 |

Примітка. $m_{\text{сум}}$ – сумарна поверхнева густина обшивок каркасних перегородок (без урахування каркасу) або шарів скління, кг/м²; m_1 – поверхнева густина одного листа обшивки (або одного скла), кг/м².

Таблиця 1.3 – Величина поправки H_{Π} [19]

| Ширина повітряного проміжку d_{Π} , мм | Величина H_{Π} , дБ |
|--|-------------------------|
| 15-25 | 22 |
| 50 | 24 |
| 75 | 25 |
| 100 | 26 |
| 150 | 27 |
| 200 | 28 |

Крім того, для каркасних конструкцій такого виконання їх звукоізоляція збільшується на частотах $f \geq f_c$ на величину поправки $\Delta R_3 = 2$ дБ, якщо одна із обшивок складається із двох листів (шарів), а друга – із

одного шару, і на величину поправки $\Delta R_3 = 3 \text{ дБ}$, якщо обидві обшивки складаються із двох шарів листового матеріалу. Для урахування цієї поправки треба на частоті f_c (див. рис. 1.3) відмітити точку S з ординатою $R_s = R_c + \Delta R_1 + \Delta R_2 + \Delta R_3$, із якої проводять вправо відрізок ST з нахилом 7,5 дБ на октаву. Точку S з'єднують з точкою M.[23]

Графік, позначений ламаною лінією $A_1EFKLMST$ на рисунку 6, відображає частотну характеристику ізоляції повітряного шуму R, виміряної за допомогою каркасно-обшивної конструкції в децибелах (дБ).

Частотну характеристику ізоляції повітряного шуму каркасно-обшивною перегородкою, виконаною із металу, скла, гіпсокартонних плит з різною товщиною одинарних листів обшивок (при співвідношенні їх товщин не більше ніж 2,5), а також подвійного скління з різною товщиною шарів скла (при такому самому співвідношенні їх товщин), будують за наступним алгоритмом:[17]

а) будують частотну характеристику ізоляції повітряного шуму одним одинарним листом більшої товщини з поверхневою густиною m_1 згідно з побудовою частотної характеристики повітряного шуму одношаровою тонкою огорожувальною конструкцією. (лінія ABCD на рисунку 1.13). Визначають (відповідно до таблиці 1) частоту f_{c2} для другого листа обшивки меншої товщини. Будують допоміжну лінію A_1B_1 до частоти f_{B1} додаючи до значень звукоізоляції листа з більшою товщиною поправки ΔR_1 , яку визначають відповідно до таблиці 6 в залежності від співвідношення $m_{\text{сум}}$ (без урахування маси каркасу) і поверхневої густини листа більшої товщини m_1 . Між частотами f_{B1} і f_{c2} проводять горизонтальний відрізок B_1C_1 . Із точки C_1 проводять відрізок C_1D_1 з нахилом 7,5 дБ на октаву;[17]

б) визначають резонансну частоту конструкції f_p згідно формули (1.3). До частоти $0,8f_p$ частотна характеристика ізоляції повітряного шуму конструкцією збігається з допоміжною кривою A_1B_1 (відрізок A_1E на рисунку

14). На частоті f_p звукоізоляцію приймають на 4 дБ нижчою від допоміжної лінії A_1B_1 (точка F). Точки E і F з'єднують між собою;

в) на частоті $8f_p$ визначають K з ординатою $R_K = R_F + H_{\Pi}$, де H_{Π} – поправка, яку визначають відповідно до таблиці 3 в залежності від ширини повітряного проміжку d_{Π} . Точку K з'єднують з точкою F.[24]

Від K частотну характеристику будують паралельно кривій $A_1B_1C_1D_1$, тобто проводять відрізок KL з нахилом 4,5 дБ на октаву до частоти f_{B1} , потім проводять горизонтальний відрізок LM до частоти f_{C2} і далі відрізок MN з нахилом 7,5 дБ на октаву(в інших джерелах 4 дБ на октаву і 9 дБ на октаву). Якщо $f_{B1} = 8f_p$, точки K і L зливаються в одну. Якщо частота $f_{B1} < 8f_p$, то відрізок FK проводять тільки до точки L, яка відповідає частоті f_{B1} . Точка K в даному випадку лежить поза частотною характеристикою і є допоміжною.

Ламана лінія $A_1EFKLMN$ на рисунку 1.14 являє собою частотну характеристику ізоляції повітряного шуму R , дБ, даною конструкцією.

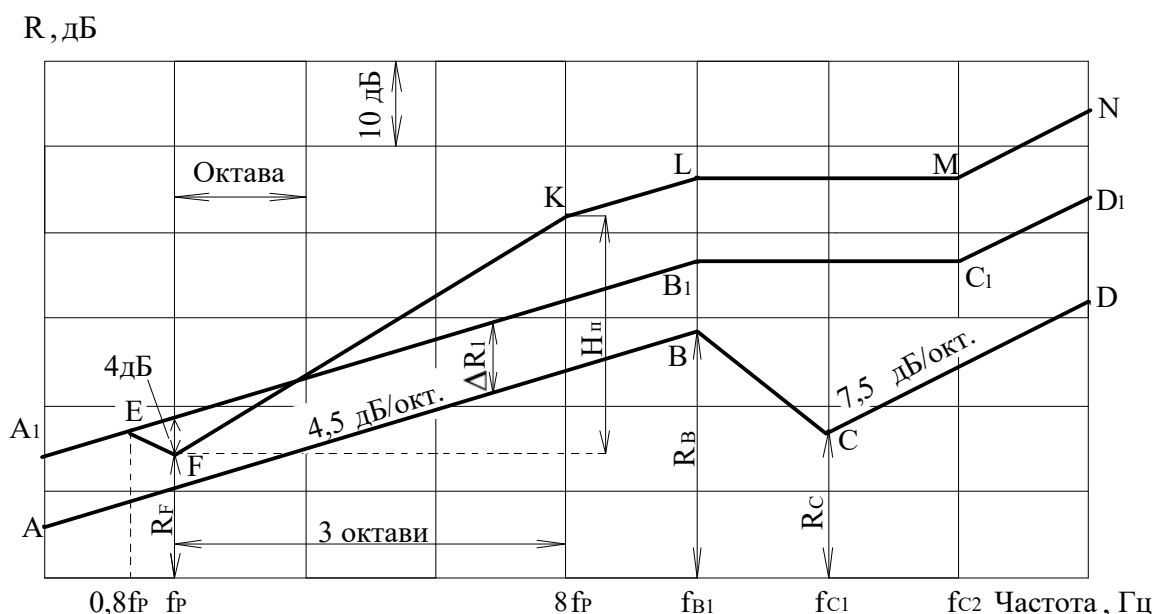


Рисунок 1.14 – Частотна характеристика ізоляції повітряного шуму огорожувальною конструкцією, яка складається із двох тонких одинарних листів (обшивок) різної товщини з повітряним проміжком між ними

Частотну характеристику ізоляції повітряного шуму каркасно-обшивною перегородкою, виконаною із одного з матеріалів наведених у розділі для рис. 14, при заповненні повітряного проміжку між обшивками пористим або пористоволокнистим матеріалом, будують у такій послідовності:

а) будують частотну характеристику звукоізоляції відповідної конструкції з незаповненим повітряним проміжком згідно з побудовою рис. 13 та 14. При цьому до сумарної поверхневої густини конструкції $m_{\text{сум}}$, при визначенні поправки ΔR_1 , додають поверхневу густину заповнювача повітряного проміжку;

б) визначають резонансну частоту конструкції f_p . При заповненні повітряного проміжку повністю або частково мінераловатними чи скловолокнистими плитами або матами частоту f_p визначають згідно з формулою (1), в якій m_1 і m_2 – сумарна поверхнева густина відповідно кожної із обшивок.

При заповненні проміжку матеріалом з жорстким скелетом (пінополістирол, фібrolіт тощо) частоту резонансу f_p , визначають за формулою:

$$f_p = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{E_d(m_1+m_2)}{d_{\Pi}m_1m_2}}, \quad (1.4)$$

де m_1 і m_2 – сумарна поверхнева густина відповідно кожної із обшивок, кг/м²;

d_{Π} – ширина повітряного проміжку між обшивками, м;

E_d – динамічний модуль пружності матеріалу заповнювача проміжку між обшивками, Па.

Якщо обшивки не приклеєні до матеріалу заповнювача, величину E_d приймають за 0,75.

Розраховану частоту f_p заокруглюють до величини середньгеометричної частоти третиннооктавної смуги, в межах якої вона знаходиться;

в) до частоти резонансу ($f \leq f_p$) частотна характеристика звукоізоляції даної конструкції збігається з частотною характеристикою, побудованою для перегородки з незаповненим повітряним проміжком (відрізок A_1EF на рисунку 15).

На частотах $f \geq 1,6f_p$ звукоізоляція даної конструкції збільшується додатково на поправку ΔR_4 , дБ, яку визначають згідно з таблицею 1.4.

При побудові частотної характеристики звукоізоляції на частоті $f = 1,6f_p$ (на дві третиннооктавні смуги вище від частоти резонансу) визначають точку Q з ординатою на величину ΔR_4 вищою від точки, яка лежить на відрізку FK , і з'єднують її з точкою F .

Потім від точки Q будують частотну характеристику паралельно частотній характеристиці звукоізоляції конструкції з незаповненим повітряним проміжком.

Ламана лінія $A_1EFQK_1L_1M_1N_1P_1$ (для одношарових плоских конструкцій) або ламана лінія $A_1EFQK_1L_1M_1S_1T_1$ (для каркасно обшивних конструкцій на рисунку 1.15 являє собою частотну характеристику ізоляції повітряного шуму R , дБ, даною огорожувальною конструкцією.

За аналогічним правилом будують частотну характеристику ізоляції повітряного шуму для каркасно-обшивною перегородок при різній товщині шарів облицювання при заповненні проміжку між обшивками звукопоглинальним матеріалом.

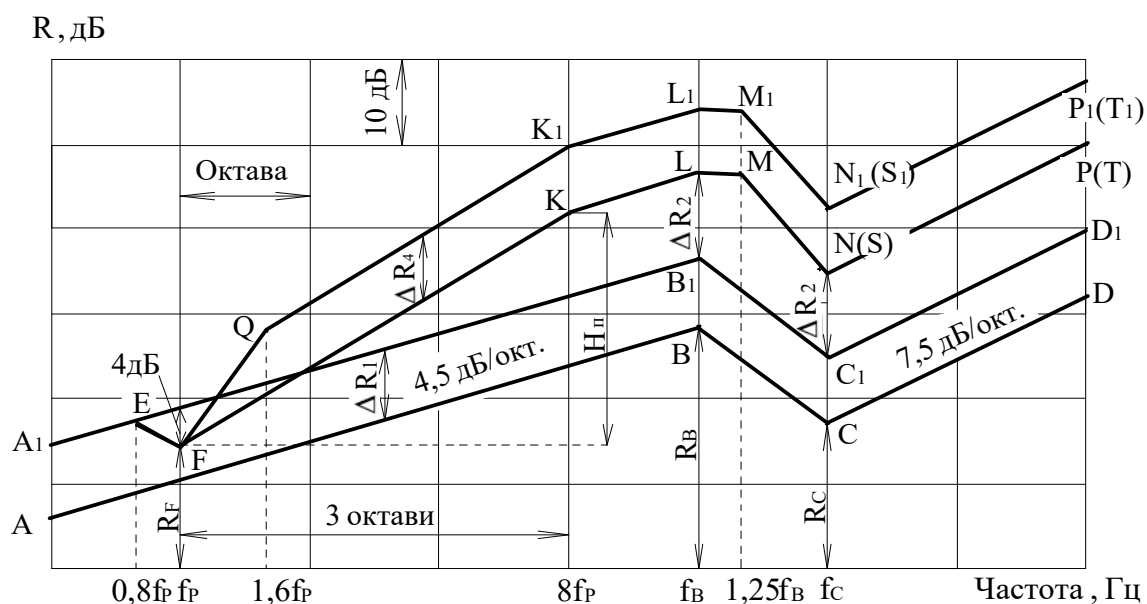


Рис. 1.15— Частотна характеристика ізоляції повітряного шуму каркасно-обшивною перегородкою з заповненням проміжку між обшивками звукопоглинальним матеріалом[17]

Таблиця 1.4— Величина поправки ΔR_4 [20]

| Матеріал заповнювача | Заповнення проміжку між обшивками, % | ΔR_4 , дБ |
|--|--------------------------------------|-------------------|
| Пористо-волокнистий (мінеральна вата, скловолокно) | 20 % | 2 |
| | 30 % | 3 |
| | 40 % | 4 |
| | 50 % – 100 % | 5 |
| Пористий з жорстким скелетом (пінополістирол тощо) | 100 % | 2 |

Подібна методика використовується по всьому світу а у всіх відомих нормах, але з деякими поправками та нюансами. Ці поправки не є дуже важливими, бо стосуються тільки кутів нахилу кривих та коефіцієнтів, які використовуються при моделюванні.

1.7 Програмне забезпечення для розрахунку ізоляції повітряного шуму

Програмне забезпечення INSUL прогнозує втрату передачі звуку у 4 різних частотних зонах (рис. 1.16).

Зона 1

На низьких частотах закон мас визначає спочатку втрати передачі. рівень звукоізоляції збільшується на 6 дБ/октаву, але INSUL може враховувати низькочастотну неефективну радіацію (посилання на розділ на окремих панелях).

Зона 2

Вище резонансної частоти масо-повітряна маса перегородки (f_0), яка визначається вагою панелей та повітряним зазором, рівень звукоізоляції збільшується на 18 дБ/октаву, коли обидві сторони стають відокремленими.

Зона 3

Коли ширина порожнини зрівнюється з довжиною хвилі за частотою, модулі порожнини поєднують панелі разом, і рівень звукоізоляції збільшується на 12 дБ/октаву.

Зона 4

Тверді з'єднання виступають звуковими мостами між двома панелями, а рівень звукоізоляції обмежується постійним значенням, більшим за норму маси, і збільшується лише на 6 дБ/октаву.

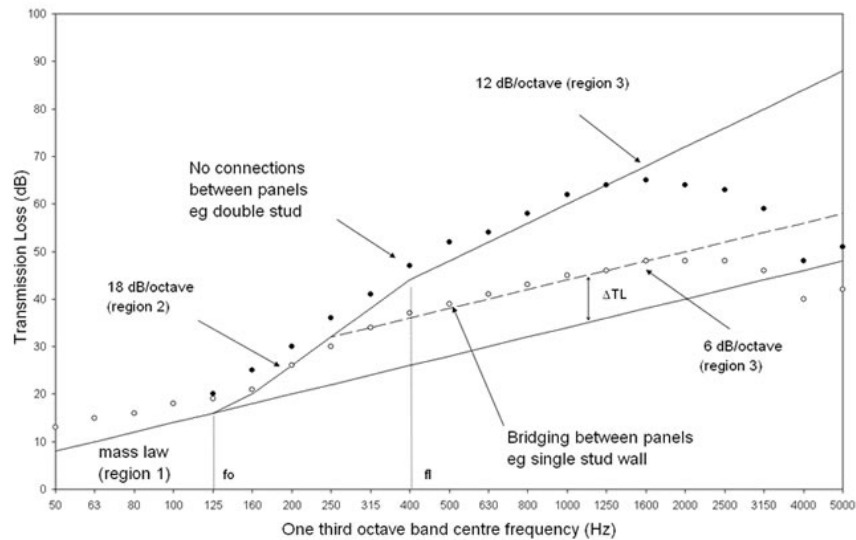


Рис. 1.16 Частотна характеристика ізоляції повітряного шуму розрахована INSUL

Після виконання науково-дослідницької роботи у попередніх розділах було встановлено відсутність загальноприйнятої методики розрахунку звукоізоляції багатошарових конструкцій, яка була б прийнятна та зрозуміла як для впровадження її у державні будівельні норми, так і для використання її у побутових, прикладних цілях. На сьогодні існуючі методології дозволяють проводити розрахунок звукоізоляційних характеристик лише однорідних конструкцій та цілком монолітних конструкцій. На жаль, формули та методики, що дозволяють виконати розрахунки для систем виконаних за каркасною системою (рис. 1.17) немає. Існує програмне забезпечення INSUL (Нова Зеландія), яке дозволяє змодельовати необхідну конструкцію та виконати розрахунки амплітудно частотної характеристики та індексів звукоізоляції будівельних конструкцій.

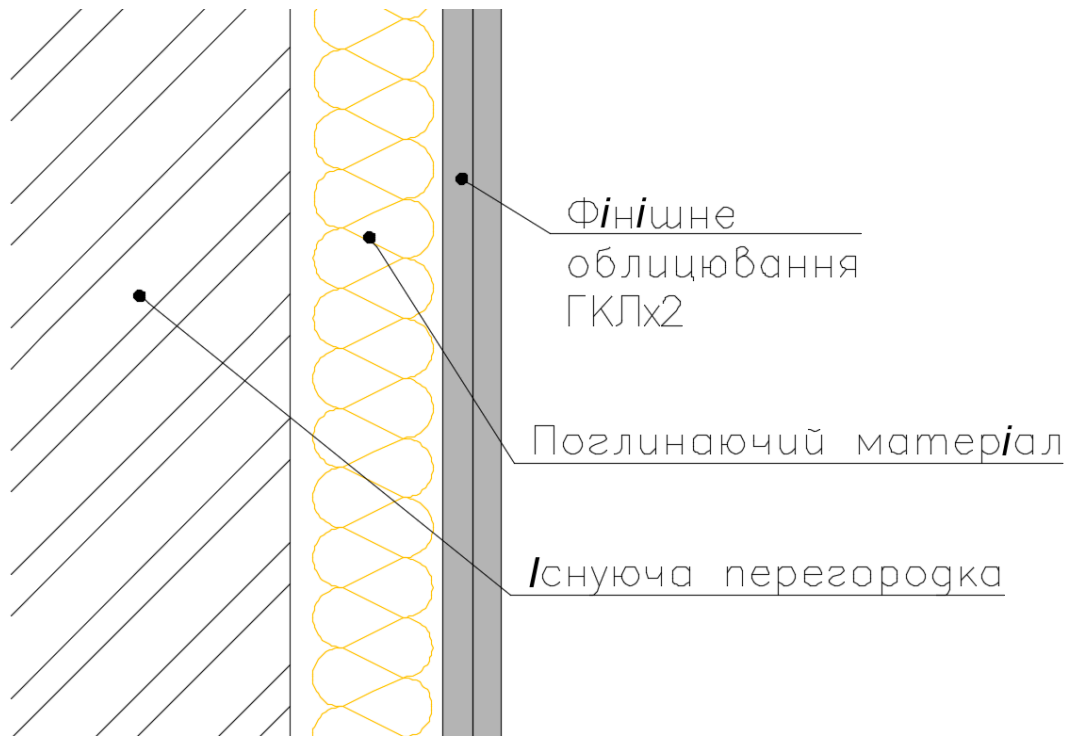


Рис. 1.17 – Модель звукоізоляційного облицювання стіни

Алгоритм, формули та методика розрахунку не відома. З власного досвіду використання Insul, можу зробити висновок що до неточності показників отриманих даних. Значення отримані в ході програмного моделювання суттєво відрізняються в натурних вимірювань на об'єктах (більш детальні дані будуть наведені нижче). Ця похибка можливо викликана за рахунок ефекту резонансу, який виникає при співвідношенні хвильових розмірів матеріалів.

1.8 Висновки до розділу 1

1. Розвиток науки у сфері архітектурної науки та звукоізоляції надзвичайно велика у зв'язку з ростом шумового забруднення в сучасному світі. Відкриття нових матеріалів, технологій та наукові дослідження в цій галузі сприятимуть покращенню якості життя, здоров'я та загального добробуту суспільства.

2. При будівництві та проєктуванні загально прийнятими та найчастіше вживаними є конструкції з цегли, газоблоку, залізобетонних панеле, тощо. Найефективнішими з них є стіни з цегляної кладки та з залізобетонних панеле ($R_w=58$ дБ та $R_w=52$ дБ відповідно).

3. Для розв'язання задачі віброізоляції (інженерних систем, обладнання, вібророзв'язки поверхонь) використовую пружні матеріали, густина яких $\rho \geq 135 \text{ кг/м}^3$.

4. На сьогоднішній день найпоширенішими матеріалами у сфері звукоізоляції є: мінеральна вата, пінопласт, полімерні мембрани та листові матеріали. Вони використовуються у будівництві та ремонті для створення комфортного та тихого простору та є незамінними компонентами сучасних систем звукоізоляції. Мінеральна вата є ефективним абсорбентом звуку. Її використання дозволяє уникнути витоку звуку через стіни та перекриття. Крім того, цей матеріал має високу теплоізоляційну здатність, що робить його важливим компонентом для створення енергоефективних приміщень. Пінопласт легкий, міцний і простий у використанні. Пінопластові плити можуть бути використані для утеплення стін та перекриттів, але його сфера застосування менша ніж у вати. Полімерні мембрани надають додаткову захист від звуку та вологи. Вони мають високу масу, що робить їх ідеальними для використання в задачах в яких необхідна підвищена ефективність звукоізоляційних конструкцій. Листові матеріали, такі як гіпсокартон чи МДФ, також можуть бути використані як звукоізоляційні шари. Вони

надають додаткову масу та щільність конструкції, що сприяє поглибленню звуку та підвищенню звукоізоляційних характеристик.

Використання цих матеріалів у поєднанні дозволяє створити надійну та ефективну систему звукоізоляції для будь-якого приміщення. При цьому важливо враховувати особливості конструкції та призначення приміщення, щоб досягти найкращого результату в забезпеченні комфортного акустичного середовища. До найпоширеніших засобів звукоізоляції можна віднести перегородка з вищезазначених матеріалів, конструкції звукоізоляційного облицювання існуючих масивних однорідних стін.

5. Сучасні методи розрахунку звукоізоляції дозволяють отримати значення індексів звукоізоляції та амплітудно-частотні характеристики для однорідних конструкцій. Алгоритми наведені у розділі 1 дозволяють точно прорахувати значення, у випадку якщо ми знаємо всі необхідні коефіцієнти та характеристики використаного будівельного матеріалу.

Окрім розрахункових методів існує програмне забезпечення, що дозволяє отримати результати подібні до розрахункових, але обидва способи відрізняються від лабораторних результатів.

Проте, для сучасних методів будівництва відсутні способи простого, зрозумілого та швидкого методу розрахунку індексу звукоізоляції багат шарових конструкцій. Запропоновані методики не підходять для вирішення поставлених мною проблеми. Тому вирішення цього питання є актуальною проблемою, метод вирішення якої запропонований далі.

2 АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ МЕТОДІВ ЗВУКОІЗОЛЯЦІЇ

У цій частині дисертації представлено порівняння експериментальних вимірювань звукопроникності стін і підлоги з теоретичними моделями на основі попередніх робіт автора . Розглянуто окремі однорідні панелі, маса, коефіцієнт жорсткості та розміри, які вважаються прийнятними для опису найпоширеніших будівельних конструкцій. Також розглянуто багатошарові конструкції стін з додатковим повітряним проміжком між панелями конструкції. Досліджуються способи кріплення між панелями та звукопоглинання в порожнині, що дозволяє отримати коректні передбачення втрат під час передачі звуку.

2.1 Аналітичні дослідження

Загальноприйнятим параметром що описує звукоізоляцію огорожувальних конструкцій будівель і приміщень є індекс ізоляції повітряного шуму огорожувальної конструкції R_w , дБ, та індекс приведенного рівня ударного шуму під перекриттям L_w , дБ.[8]

Розрахунок звукоізоляції проводиться при проектуванні огорожувальних конструкцій. Остаточна оцінка звукоізоляції огорожувальних конструкцій будівель, збудованих за новими типовими проектами, повинна проводитися на підставі натурних випробувань огорожувальних конструкцій експериментальних будинків

2.1.1 Однорідні панелі

Одношаровою перегородкою вважається конструкція, яка складається з одного або декількох шарів які жорстко поєднані між собою. Суцільна однорідна ізотропна плита є найпростішим способом опису стін або підлог, що зустрічається в будівництві та будівельній професійній літературі.

Загалом огорожувальні конструкції набагато складніші цієї ідеалізованої форми. Проте розуміння процесу передачі звуку через цю «пластину» має фундаментальне значення, оскільки її часто використовують як зразок для порівняння з більш складними будівельними елементами. Основні принципи передачі звуку можна пояснити, розглядаючи пластину кінцевої товщини, але нескінченного розміру. На практиці багато проблем проектування, розрахунку та вимірювання звукоізоляції пов'язані з кінцевими розмірами пластин та їх сполуками з іншими пластинами. Почавши з моделі для твердої однорідної пластини кінцевого розміру, легше зрозуміти різні концепції, розширити та інтерполювати розрахунки на складніші конструкції, які зустрічаються на практиці. Тим не менш, ми будемо використовувати модель нескінченної пластини, щоб отримати уявлення про передачу звуку в залежності від кута і відзначити важливі зв'язки між моделями кінцевих та нескінченних пластин для передачі звуку повітрям. Для передачі повітряного шуму з приміщення-джерела до приміщення-приймача через суцільну однорідну пластину потрібна модель з трьома підсистемами. Підсистема перегородки повинна бути представлена тільки через згинальні хвилі, тому що випромінювання від падіння плоских хвиль незначне. Зауважте, що, обмежуючи модель трьома підсистемами, ми ігноруємо бічну передачу і припускаємо, що вібрація може передаватися від пластини до будь-якої з'єднаної конструкції, але не навпаки. Модель базується на енергетичному потоці між групами мод при резонансі; це називається резонансною передачею. Для передачі повітряного звуку через перегородку також необхідно мати на увазі нерезонансну передачу між підсистемами. У моделі ця форма передачі обходить підсистему пластин, хоча потужність, що передається, визначається властивостями пластин (Crocker and Price, 1969).

Резонансна передача пов'язана з резонансними частотами, які потрапляють у смугу частот, в якій проводяться дослідження. У моделі, що

розглядається тут, зв'язок відбувається за рахунок кімнатних мод та мод вигину пластини.

Коефіцієнт передачі звуку τ стіни - це відношення звукової енергії, що передається стіною, до звукової енергії, що падає на стіну (2.1).

$$\tau = \frac{I_{\text{пр}}}{I_{\text{пад}}} \quad (2.1)$$

Власна звукоізоляція – коефіцієнт, який прямо пропорційний до звукопровідності (2.2):

$$\sigma = 10 \lg \left(\frac{1}{\tau} \right) \quad (2.2)$$

Таким чином, власна звукоізоляція набуває вигляду (2.3):

$$\sigma_{\text{дБ}} = 10 \lg \frac{I_{\text{пр}}}{I_{\text{пад}}} = L_{\text{пад}} - L_{\text{пр}} \quad (2.3)$$

Для нескінченної ізотропної плоскої стіни рівномірної товщини коефіцієнт передачі звуку плоскої хвилі залежить від кута θ між напрямком поширення падаючої плоскої хвилі та нормаллю до площини стіни. Для оцінки дифузного поля коефіцієнт передачі звуку τ_d необхідно усереднювати коефіцієнт передачі звуку плоскої хвилі $\tau(\theta)$ з відповідним корелюванням по всіх кутах падіння,

$$\tau_d = 2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \tau(\theta) \cos \theta \sin \theta d\theta \quad (2.4)$$

$\cos \theta$ – площа поперечного перерізу плоскої звукової хвилі, яка падає на одиницю площі стіни під кутом падіння θ до нормалі до стіни. $\sin \theta$ пов'язаний з тим, що окружність тілесного кута між θ та $\theta+d\theta$ дорівнює $2\pi \sin \theta d\theta$. $d\theta$ – виникає через те, що $\tau_d=1$ для всіх значень θ . Тому рівняння (2.4) можна переписати у вигляді

$$\tau_d = 2 \int_0^1 \tau(\Theta) d \cos^2 \Theta \quad (2.5)$$

Однак для спрощення розрахунку для однорідних панелей враховуючи, що важливою властивістю є маса одиниці площі панелі, а відомий закон маси [9] дає можливість простого розрахунку втрат під час передачі звукової енергії. Тому формулу (2.1) подають у вигляді:

$$R = 20 \log(mf) - 47 \quad (2.6)$$

Однак для більшості практичних будівельних матеріалів статична жорсткість повинна бути достатньо високою, щоб належати проміжку між звуковими хвилями що розповсюджуються в повітрі та у будівельних конструкціях лежав у діапазоні частот 50-5000 Гц. Це досліджував Крамер [12] і закон маси було дещо змінено, щоб включити зміну передачі шуму на критичній частоті і вище. Було включено залежність від жорсткості матеріалу, тобто від матеріалів стіни.

$$\tau(\Theta) = \frac{1}{\left| 1 + \frac{Z \cos \Theta}{2 \rho_0 c} \right|} \quad (2.7)$$

Де Z хвильовий опір стіни і $\rho_0 c$ імпеданс повітря, що є добутком щільності середовища і швидкості звуку у повітрі. Якщо знехтувати жорсткістю стіни, то $Z = j\omega m$, де ω кутова частота а m маса одиниці площі. Це означає, що формулу можна подати у вигляді:

$$\tau(\Theta) = \frac{1}{1 + a^2 \cos^2 \Theta}, \quad (2.8)$$

Де

$$a = \frac{\omega m}{2 \rho_0 c} \quad (2.9)$$

У своїй роботі Крамер [12] також спростив вигляд до формули: яку у нас час найчастіше використовують при розрахунках:

$$R = 20\log(mf) - 10\log(2\eta\omega / \pi\omega_c) - 47 \quad (2.10)$$

Де η - коефіцієнт загасання в стіні.

Для більшості тонких однорідних матеріалів, які зазвичай використовуються в будівництві, це забезпечує точний прогноз втрат при передачі переважного діапазону частот. Однак для отримання високої точності на низьких частотах необхідно розглянути додаткові умови. Для типового випробування конструкції 10 - 12 м² необхідно враховувати ефективність випромінювання вимушених хвиль на частоті менше 200 Гц. Сьюелл [13] вносить зміни в формулі для панелі з нескінченною площею:

$$\tau_f = \tau(0)\ln(k\sqrt{A}) \quad (2.11)$$

Де k – хвильове число та A площа огорожувальної конструкції.

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2.12)$$

Формула також має спрощений вигляд.

$$\Delta R = -\log[\ln(kA^{1/2})] + 20\log[1 - (\omega/\omega_c)^2] \quad (2.13)$$

Однак вирази (2.1), (2.2) і (2.3) не підходять для опису дуже товстих і важких конструкцій, таких як бетон або цегла. Для цих типів панелей поперечні хвилі стають більш впливовими в порівнянні з огиначаючими хвилями на високих частотах. Це впливає на втрати високочастотної передачі, знижуючи частотну залежність до 6 дБ/октаву на високих частотах [14] замість 12 дБ/октаву для тонких панелей вище критичної частоти.

Варто звернути увагу, що при моделюванні складніших конструкцій (наприклад, неоднорідних або профільованих) з використанням методу

нескінченних пластин необхідно зв'язати моделі з натурними вимірюваннями, які на практиці виконуватимуться на кінцевих пластинах, тобто конструкціях фіксованого розміру. Для зручності це часто робиться шляхом обмеження діапазону кутів падіння. На відміну від теорії кінцевих пластин, нерезонансна передача через нескінченні пластини визначається вище критичної частоти. Це означає, що у випадку, коли вібророзв'яка (демпфування) пластини досить велика, так що резонансною передачею можна знехтувати на частотах, що значно перевищують критичну частоту, то нерезонансна передача буде переважати на цих високих частотах. У будинках рідко можна зустрітися з однорідними конструкціями з таким сильним демпфуванням в діапазоні частот 63-3150 Гц. В подібних випадках використання теорії нескінченних пластин для нерезонансної передачі вище за критичну частоту зазвичай не підходить.

2.1.2 Багат шарові конструкції

Часто доводиться розраховувати акустичні характеристики багат шарових конструкції. Конструкції стін і підлог іноді складаються з тонкого облицювання з повітряним проміжком між ними, і при правильному проектуванні вони можуть дати високі індекси звукоізоляції. Найпростіший випадок для аналізу - це конструкція, що складається з двох тонких однорідних панелей, розділених повітряним шаром, та заповнені звукопоглинальним матеріалом, без стиків між облицюванням. Шарп [14] розробив такі твердження для втрат передачі в трьох діапазонах частот:

$$R=20\log(f(m_1+m_2))-47 \quad f < f_0 \quad (2.14)$$

$$R=R_1+R_2+20\log(fd)-29 \quad f_0 < f < f_l \quad (2.15)$$

$$R=R_1+R_2+6 \quad f > f_l \quad (2.16)$$

Де m_1 та m_2 маса поверхні кожного шару облицювання, d - ширина повітряного проміжку, f_0 – резонансна частота системи f_1 – частота, яка дорівнює $55/d$. R_1 та R_2 – індекси звукоізоляції згідно з (2.15 та 2.16). Наведений вираз не містить параметрів, які враховують поглиначі, які заповнюють повітряний проміжок конструкції, тому вирішення цієї проблеми має певний інтерес з точки зору практичного застосування. Фахі [11] у своїй роботі пропонує дещо альтернативний варіант виразу для високих частот.

$$R=R_1+R_2+8.6\alpha d+20\log_{10}(\beta/k) \quad f > f_1 \quad (2.17)$$

Де α та β дійсна та уявна частини коефіцієнта поглинання заповнення, k – хвильове число.

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2.18)$$

2.1.3 Багат шарові конструкції зі кріпленням

Деякі конструкції можуть бути близькими до ідеалу багат шарових конструкції без стиків, але більшість конструктивних елементів мають певний тип жорсткого або еластичного з'єднання між панелями. Шарп [15] розробив відносно прості вирази для розрахунку звукоізоляції для багат шарових конструкцій з точковим або лінійним з'єднанням.

$$R=R_1+2+20\log(e.f_c)+20\log[m_1/(m_1+m_2)]-45 \quad (2.19)$$

$$R=R_1+2+10\log(b.f_c)+20\log[m_1/(m_1+m_2)]-18 \quad (2.20)$$

Де e та b відстань між точковими та лінійними з'єднаннями відповідно. Ці вирази вірні лише нижче критичних частот обох панелей. За допомогою статистичного аналізу енергії можна отримати вирази для діапазону частот вище критичної частоти обох панелей [15]. Для з'єднань, які не є жорсткими,

таких як пружні сталеві рейки або тонкі сталеві шпильки, Ріндель вивів вирази, які враховують гнучкість з'єднання [15].

Основною акустичною характеристикою будівельної акустики є його ефективність, яка вираховується у вигляді різниці звукового тиску до перегородки та після перегородки у відповідних приміщеннях (2.21):

$$\Delta L = L_1 - L_2 \quad (2.21)$$

де L_1 – рівень звукового тиску в першому приміщенні, дБ

L_2 - рівень звукового тиску у другому приміщенні, дБ

В наслідок похилого падіння хвилі можливий ефект співпадіння або ефект резонансу. Частота співпадіння визначається за формулою (2.22):

$$f_c = \frac{c_0^2}{2\pi \sin^2 \theta_0} \sqrt{\frac{12\rho(1-\mu^2)}{E}}, \quad (2.22)$$

де E – модуль Юнга матеріалу, а μ - коефіцієнт Пуассона.

При $\theta_0 = 90^\circ$ значення частоти співпадіння називають найменшою частотою співпадіння (2.23):

$$f_{кр} = \frac{c_0^2}{2\pi h} \sqrt{\frac{12\rho(1-\mu^2)}{E}} \approx 0,55 \frac{c_0^2}{hc}, \quad (2.24)$$

де c – швидкість повздовжніх хвиль в пластині.

Критична частота визначає верхню межу закону мас. Це значення слід враховувати при розрахунках звукоізоляції для сегментування частотних показників на зону низьких частот, середніх частот та високих частот. На кожному сегменті на систему будівельної конструкції впливає свій «закон».

Так для середніх частот можливо використовувати закон мас, який дозволяє з відносно невеликою похибкою розрахувати амплітудно-частотну характеристику конструкції. Загальна формула закону мас наведена в (2.25):

$$R = 20 \lg(m \cdot f) - 47 \quad (2.25)$$

де m – поверхнева маса конструкції кг/м^2 , а f – частота, Гц.

Доречно буде сказати, що до області середніх частот також часто додають область резонансу маси і пружності пластин ($f_p < f < 2f_p$)

На низьких частотах конструкція діє як пластина та управляється законом мас.

На високих частотах ($f > f_{кр}$) проявляється ефект збігу (співпадіння частот), через які звукоізоляційні показники конструкції падають. Для зменшення впливу ефекту необхідно збільшити пружність всієї системи. На рисунку 18 вказана типова модель частотної характеристики перегородки.

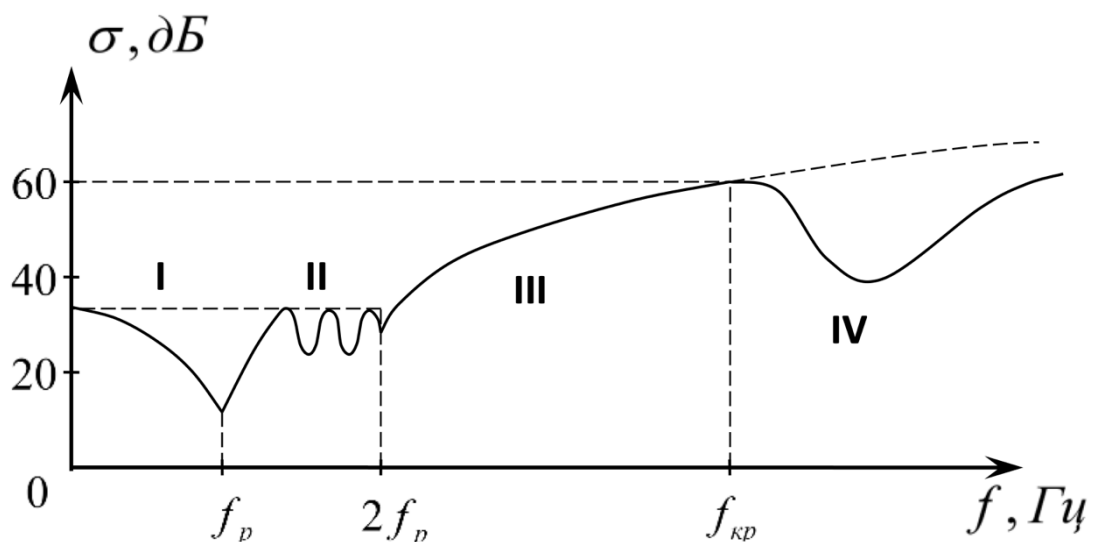


Рис. 2.1 - типова модель частотної характеристики перегородки

Де I - область низьких частот, II та III - область середніх частот, IV – область високих частот.

Зважаючи на вищезазначене, можна зробити висновок, що існуюча велика кількість формул і методик, які зараз використовуються, теоретично охоплює всі необхідні аспекти. Однак на практиці виявляється, що ці формули та методики не завжди є повністю релевантними або практично застосовними для проєктувальників та інженерів.

Причиною цього може бути ряд факторів. По-перше, багато з існуючих формул та методик можуть бути досить складними та часом непрозорими для практичного застосування. Вони можуть базуватися на спрощених або

недостатньо реалістичних припущеннях, що обмежує їхню застосовність у реальних умовах.

По-друге, швидкий темп розвитку технологій та нові вимоги до конструкцій призводять до того, що існуючі методики можуть старіти та ставати менш ефективними. Проєктувальники та інженери постійно шукають більш ефективні та інноваційні підходи для розв'язання завдань звукоізоляції.[26]

Отже, виникає необхідність у розробці нових методів розрахунку та передбачення звукоізоляції конструкцій. Ці методи повинні враховувати сучасні технології та реалістичні умови експлуатації. Такий підхід допоможе підвищити якість проєктування та зменшити час, потрібний для розробки проєктів.

Однак розробка нових методів також може бути викликом. Вона вимагає глибокого розуміння фізичних процесів, сучасних матеріалів та обчислювальних методів. Крім того, нові методи потребують перевірки та валідації через експерименти та практичні випробування, щоб підтвердити їхню ефективність та точність.

Отже, важливо підтримувати баланс між використанням існуючих методик та розробкою нових підходів. Інженери та дослідники повинні співпрацювати для створення більш точних, ефективних та практичних методів звукоізоляції, які відповідають сучасним вимогам та сприяють досягненню якісних результатів у проєктуванні.

2.2 Комп'ютерне моделювання

2.2.1 Моделювання за допомогою INSUL

Для коректності створення методології, розрахунку частотної характеристики звукоізоляції, перегородки вказаної на рис. 2.1 були проведені моделювання в ПЗ Insul та за наближеними методами вказаними у попередньому розділі. Результати будуть наведені нижче.

Для доцільності та актуальності роботи були обрані найтипівіші будівельні конструкції, які складаються з цегли 120 мм + 100 мм акустичної вати + 2 шари ГКЛ, другий тип цегла 240 мм + 100 мм акустичної вати + 2 шари ГКЛ. Поверхнева маса цегли 120 мм дорівнює 200 кг/м², цегла 240мм 400 кг/м², а маса 100 мм вати та двох шарів ГКЛ 31 кг/м², та аналогічні конструкції з заповненням 50мм ватою. Виходячи з цих даних маємо показники вказані в табл. 2.1-2.4. Для зручності запису при демонстрації результатів використовуємо октавний спектр частот. При побудові графіків використовувався третиннооктавний спектр частот. У таблицях 5-8 зазначені значення частотних характеристик вищеописаних конструкцій розраховані у ПЗ INSUL.

Таблиця 2.1 – частотна характеристика системи 120 мм цегла + 50 мм вата + 2 шари ГКЛ розраховано за ПЗ Insul

| | | | | | | | |
|---------------------------------|-----------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|
| Частота, Гц | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 |
| Рівень звукоізоляції, дБ | 27 | 49 | 51 | 58 | 66 | 67 | 82 |

Таблиця 2.2 – частотна характеристика системи 240 мм цегла + 50 мм вата + 2 шари ГКЛ розраховано за ПЗ Insul

| | | | | | | | |
|---------------------------------|-----------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|
| Частота, Гц | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 |
| Рівень звукоізоляції, дБ | 33 | 55 | 57 | 63 | 70 | 73 | 92 |

Таблиця 2.3 – частотна характеристика системи 120 мм цегла + 100 мм вата + 2 шари ГКЛ розраховано за ПЗ Insul

| | | | | | | | |
|---------------------------------|-----------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|
| Частота, Гц | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 |
| Рівень звукоізоляції, дБ | 35 | 55 | 51 | 58 | 65 | 67 | 86 |

Таблиця 2.4 – частотна характеристика системи 240 мм цегла + 100 мм вата + 2 шари ГКЛ розраховано за ПЗ Insul

| | | | | | | | |
|---------------------------------|-----------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|
| Частота, Гц | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 |
| Рівень звукоізоляції, дБ | 42 | 61 | 57 | 63 | 70 | 73 | 92 |

Відповідно до нормативних документів власна звукоізоляція розраховується як десять десятикових логарифмів відношення інтенсивності звукових хвиль, що падають на огорожувальну конструкцію, до інтенсивності звукових хвиль, що пройшли крізь цю конструкцію. Обов'язковою умовою є відсутність обхідних (конструкційних) шляхів передачі звуку.[15]

При моделюванні значення поверхневої маси цегли 120 мм була прийнята у 200 кг/м², поверхнева маса цегли 240 мм була прийнята у 400 кг/м², поверхнева маса двох шарів гіпсоволокнистих плит та вати, без залежності від товщини, була прийнята як 31 кг/м².

2.2.2 Порівняльний аналіз комп'ютерного моделювання та експериментальних даних

При експериментальних розрахунках необхідно дотримуватися наступних правил проведення вимірювань. Джерело звуку повинно бути з всебічним випромінюванням шуму (додекаедр), створювати у приміщенні дифузне поле. Мікрофони або шумомір повинні знаходитися у приміщенні з низьким рівнем тиску та бути поза межами прямого звуку від джерела шуму. Мікрофони або шумомір повинні знаходитися на відстані не менше ніж 0,7м від досліджуваної конструкції. Джерело шуму, в свою чергу, повинно знаходитися на відстані не менше ніж 2,5м від досліджуваного об'єкту. Для вимірювань рекомендується використовувати «білий» шум. Цей тип шуму особливий тим, що його спектральні складові рівномірно розподілені по всьому діапазону частот. Вимірювання звукового тиску у обох приміщеннях повинно проводитися не менше ніж у шести контрольних точках. Вимірювання повинні бути виконані у третиннооктавних смугах. Згідно з (2.3):

$$L_1 = \frac{p_1^2}{4\rho^0 c^0}, \quad (2.26)$$

де S – площа випробуваного зразка, м^2 , ρ_0 – густина повітря, кг/м^3 , c_0 – швидкість звуку в повітрі, м/с , p_1 – середній звуковий тиску в приміщенні з джерелом звуку, Па .

$$L_2 = \frac{p_2^2}{4\rho_0 c_0}, \quad (2.27)$$

$$A_2 \approx 0,16 \frac{V_2}{T_2},$$

де ρ_0 – густина повітря, кг/м^3 , c_0 – швидкість звуку в повітрі, м/с , p_2 – середній звуковий тиску в приміщенні з джерелом звуку, Па , A_2 – площа поглиначів в приміщенні куди поширюється звук з першого приміщення., м^2 . Величини V_2 та T_2 – об'єм та час реверберації, відповідно, згідно формули Себіна. Ізоляцію повітряного шуму огорожувальною конструкцією розраховують за наступною формулою (2.28):

$$R = L_1 + L_2 + 10\lg\left(\frac{S}{A_2}\right) \quad (2.28)$$

У табл. 2.5-2.8 наведені результати експериментальних вимірювань на об'єктах. Вимірювання проводилося шумоміром Brüel & Kjær (Данія) модель 1613, свідоцтво про повірку № 22-01/2571/16 чинне до 20 липня 2023р. Об'єктами були реальні квартири, в яких проводилися будівельні роботи по збільшенню рівня звукоізоляції міжквартирних перегородок. Експерименти проводилися у період з 2020-2022 роки на різних об'єктах. Отриманих даних значно більше. Для економії часу та об'єму дисертації були обрані типові найпоширеніші значення. Також значення приведені до середніх по частотах. У Додатку Б наведені результати експериментів з натурних об'єктів з різними конструкційними елементами (перегородками).

При експериментальних вимірюваннях значення поверхневої маси цегли 120 мм була у 200 кг/м^2 , поверхнева маса цегли 240 мм була у 400 кг/м^2 , поверхнева маса двох шарів гіпсоволокнистих плит та вати, без залежності від товщини, була 31 кг/м^2 .

Таблиця 2.5 – частотна характеристика системи 120 мм цегла + 50 мм вата + 2 шари ГКЛ за експериментальними натурними даними

| | | | | | | | |
|---------------------------------|-----------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|
| Частота, Гц | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 |
| Рівень звукоізоляції, дБ | 22 | 45 | 48 | 54 | 68 | 68 | 84 |

Таблиця 2.6 – частотна характеристика системи 240 мм цегла + 50 мм вата + 2 шари ГКЛ за експериментальними натурними даними

| | | | | | | | |
|---------------------------------|-----------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|
| Частота, Гц | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 |
| Рівень звукоізоляції, дБ | 29 | 50 | 52 | 60 | 72 | 70 | 89 |

Таблиця 2.7 – частотна характеристика системи 120 мм цегла + 100 мм вата + 2 шари ГКЛ за експериментальними натурними даними

| | | | | | | | |
|---------------------------------|-----------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|
| Частота, Гц | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 |
| Рівень звукоізоляції, дБ | 33 | 53 | 55 | 57 | 63 | 67 | 91 |

Таблиця 2.8 – частотна характеристика системи 240 мм цегла + 100 мм вата + 2 шари ГКЛ за експериментальними натурними даними

| | | | | | | | |
|---------------------------------|-----------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|
| Частота, Гц | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 |
| Рівень звукоізоляції, дБ | 39 | 57 | 58 | 65 | 73 | 75 | 89 |

На рисунках 2.2-2.5 зображено порівняння частотних характеристик отриманих за допомогою моделювання в ПЗ Insul та з експериментальними даними.

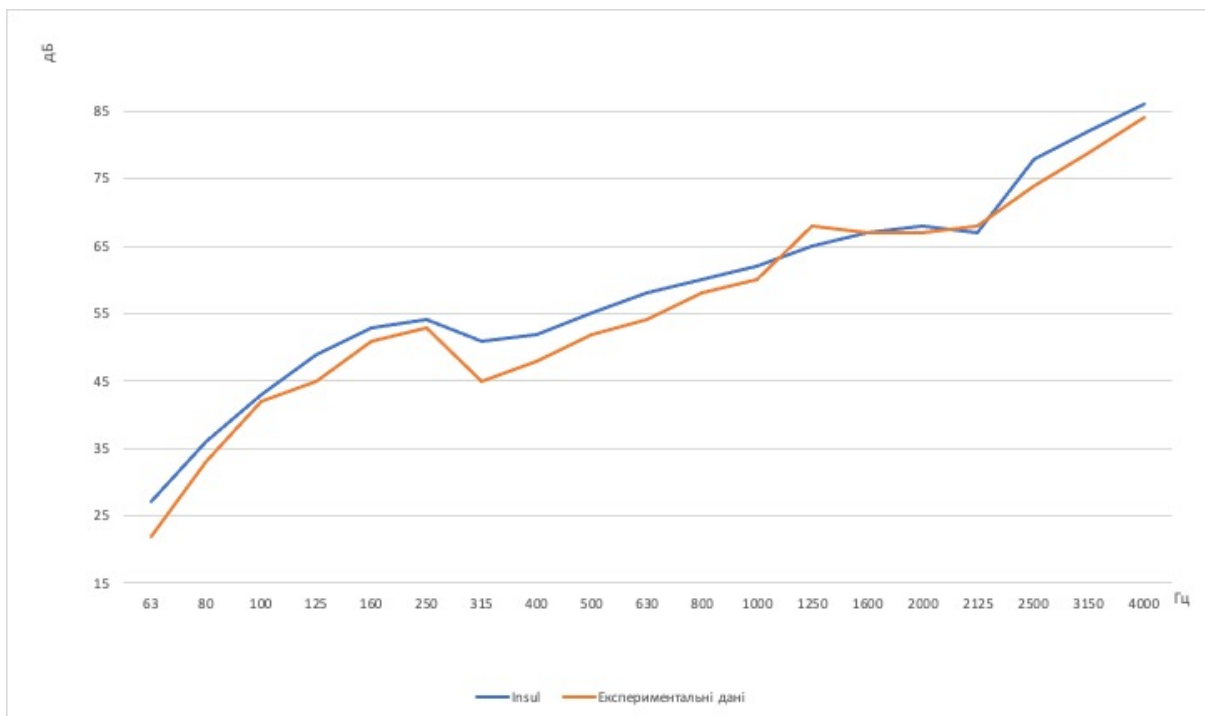


Рис. 2.2 Порівняння частотних характеристик отриманих за допомогою ПЗ INSUL та експериментально натурними даними для конструкції з 120 мм цегла + 50 мм вата + 2 шари ГКЛ

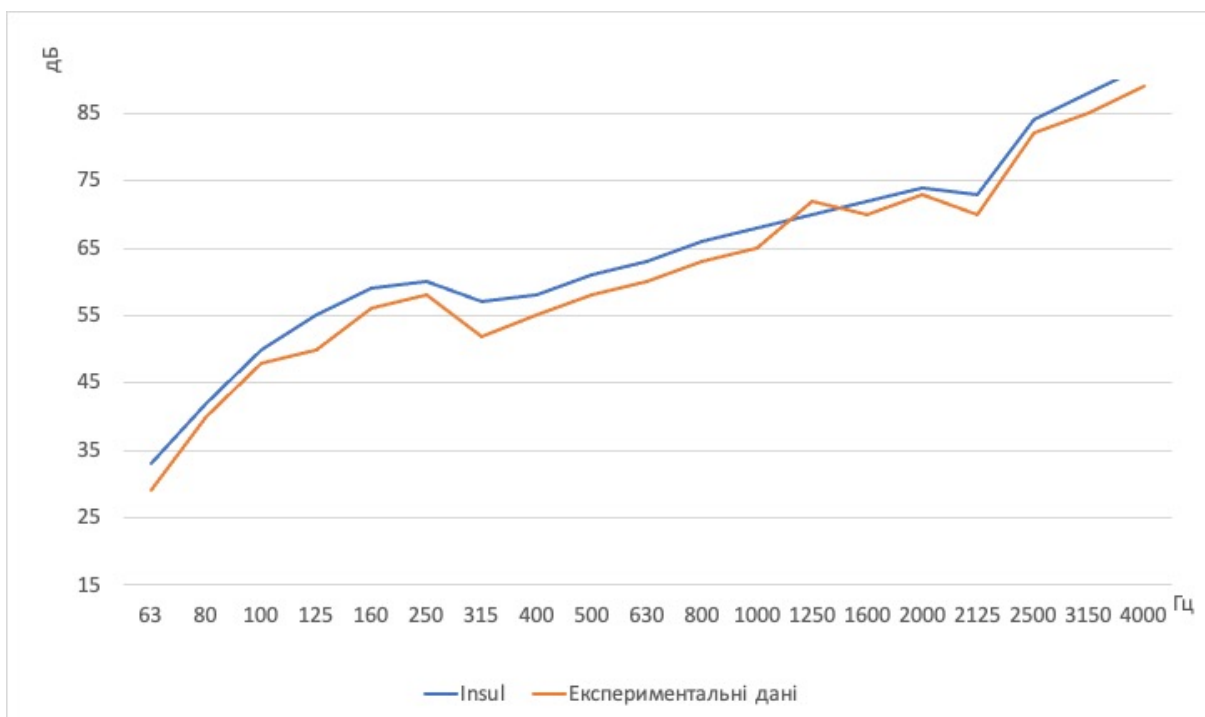


Рис. 2.3 – Порівняння частотних характеристик отриманих за допомогою ПЗ INSUL та експериментально натурними даними для конструкції з 240 мм цегла + 50 мм вата + 2 шари ГКЛ

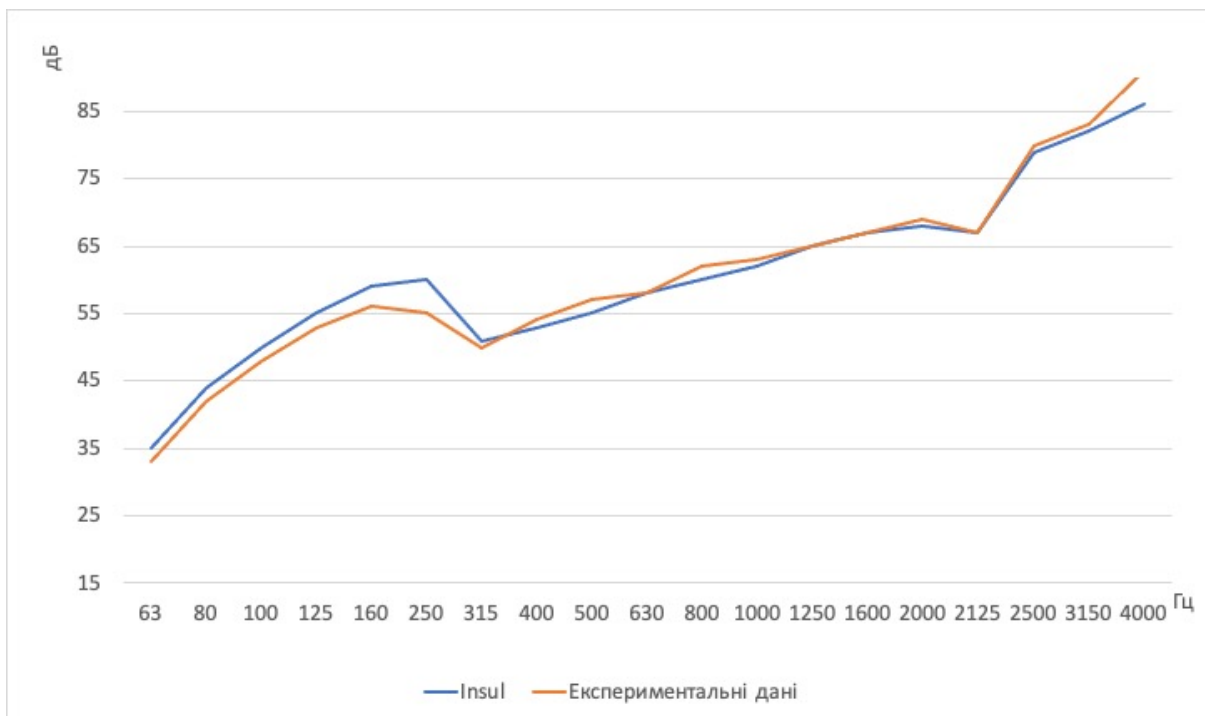


Рис. 2.4 Порівняння частотних характеристик отриманих за допомогою ПЗ INSUL та експериментально натурними даними для конструкції з 120 мм цегла + 100 мм вата + 2 шари ГКЛ

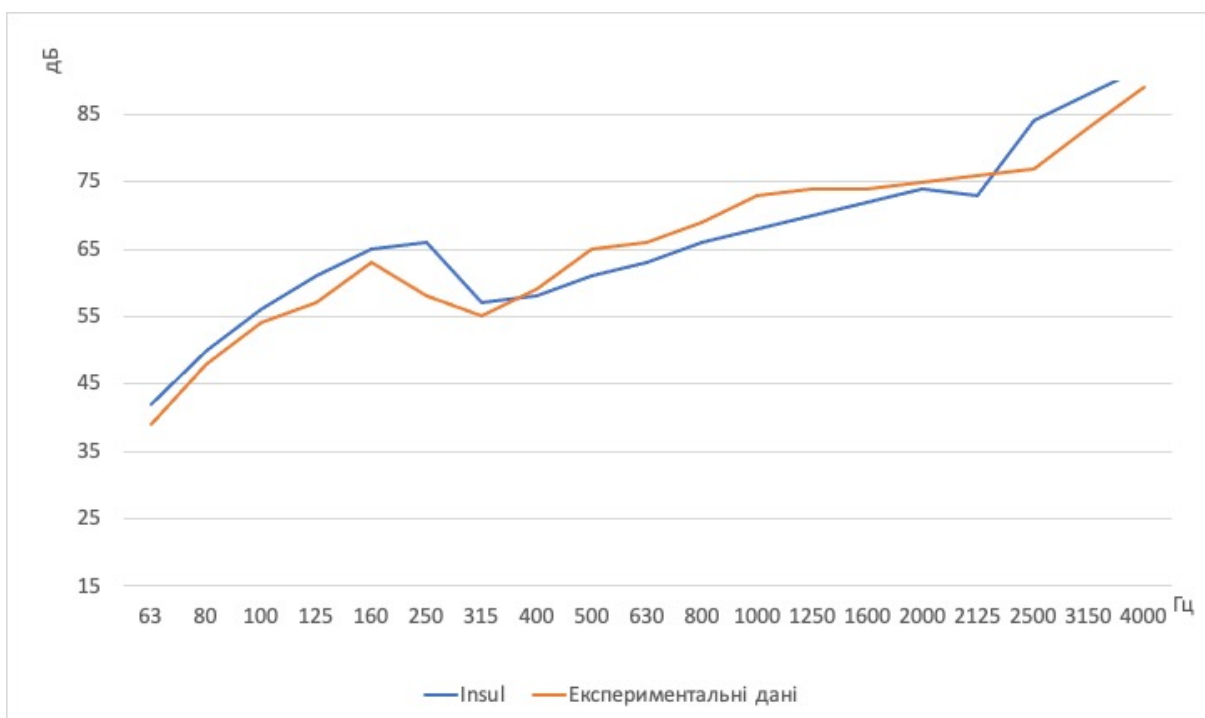


Рис. 2.5 Порівняння частотних характеристик отриманих за допомогою ПЗ INSUL та експериментально натурними даними для конструкції з 240 мм цегла + 100 мм вата + 2 шари ГКЛ

Аналізуючи отримані результати можна помітити декілька нюансів за якими результати відрізняються. По-перше, є різниця в «плавності» кривої, яка в ПЗ Insul зумовлена лінійністю побудування графіку, а саме на низьких частотах береться до уваги нахил кривої у 6 дБ/октаву, на середньо-низьких 18 дБ/октаву, на середніх 12 дБ/октаву і на високих 6 дБ/октаву з урахуванням коефіцієнтів С, які невідомі та захищені авторським правом ПЗ Insul.

Деяка гострокутність графіків побудованих за експериментально натурними даними можна пояснити метричними похибками, пов'язаними тим, що шумомір – аналоговий пристрій, результати якого знімаються не програмно, а наочно. Обробка відбувається програмно, через що нема плавності графіку.

Друга відмінність полягає у числовій відмінності між програмним моделюванням значень та результатами натурних вимірювань. Як можна побачити з таблиць 1-8 в середньому на один тип конструкції похибка становить 3-5 дБ. Це відносно невелика похибка, так як програмне моделювання не враховує якість та кількість вібродемпфуючих кріплень: ефект бічного (конструкційного) проходження звуку, об'єм приміщення, фонд поглинання.

Для приблизної оцінки та передбачення рівнів звукоізоляції комп'ютерний метод є прийнятним, але не досконалим. Враховувати це при проектуванні можливо, але не професійно, через неточні дані.

Доречно буде сказати про можливу необхідність розрахунку частотних характеристик згідно державних будівельних норм України. На жаль, сучасні норми не регулюють розрахунок багатошарових конструкцій. В їх рекомендаціях надано лише порядок розрахунку для однорідних, тонких листових та двошарових конструкцій. Всі ці методи не враховують заповнення конструкції поглинаючим матеріалом, та конструктивні особливості таких огорожувальних приміщень.

2.3 Висновки до розділу 2

1. Загалом, основною проблемою вище зазначених методів є те, що формула, хоч і є потужним інструментом, все ж таки не завжди надає точні результати в усіх ситуаціях. З іншого боку, INSUL, незаперечно, пропонує ефективний та зручний підхід для розв'язання задач розрахунку звукоізоляції, але, відносно натурних даних обидва методи не є релевантними.

2. У виразах отриманих Крамером та Сьюеллом для оцінки ефективності звукоізоляційних характеристик однорідних конструкцій не враховані особовості однорідних товстих і важких конструкцій. Це впливає на зниження ефективності конструкції на 6 дБ/октаву замість 12 дБ/октаву у діапазоні високих частот.

На практиці часто виявляється, що наведені формули та методи не завжди повністю відповідають потребам проєктантів та інженерів. Це може бути зумовлено кількома причинами. По-перше, багато існуючих формул та методик можуть бути вкрай складними та не завжди зрозумілими для практичного використання. Вони можуть ґрунтуватися на спрощених або нереалістичних припущеннях, що обмежує їхню застосовність у реальних умовах. По-друге, швидкі темпи розвитку технологій та нові вимоги до конструкцій призводять до того, що існуючі методики можуть втрачати актуальність та ставати менш ефективними. Проєктувальники та інженери постійно шукають більш ефективні, прості та інноваційні підходи для вирішення завдань звукоізоляції.

3. Деяка різність графіків, побудованих на основі експериментальних даних, може пояснюватися метричними похибками, пов'язаними з тим, що шумомір - аналоговий прилад, результати якого фіксуються візуально, а не програмно. Обробка проводиться програмно, що може вплинути на гладкість графіку.

4. Ще однією помітною відмінністю є числова розбіжність між програмним моделюванням значень та результатами реальних вимірювань.

Згідно з таблицями 1-8, в середньому, для одного типу конструкції похибка становить 3-5 дБ. Це відносно невелика похибка, оскільки програмне моделювання не враховує якість та кількість вібродемпфуючих кріплень, а також ефекти бічного (конструкційного) проходження звуку, об'єм приміщення та фонове поглиблення.

Для приблизної оцінки та прогнозування рівнів звукоізоляції можна використовувати комп'ютерні методи, проте вони не є ідеальними через несхожість даних. Врахування цих даних у проектуванні можливе, але вимагає особливої уваги через їх невиразність.

5. Слід відзначити можливу потребу у розрахунку частотних характеристик у відповідності до державних будівельних норм України. Сучасні норми, на жаль, не охоплюють розрахунок багатошарових конструкцій. У їх рекомендаціях надається лише загальний підхід до розрахунку для одношарових тонких листових або двошарових конструкцій. Усі ці методи не враховують заповнення конструкції поглинаючим матеріалом.

3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

3.1 Методика проведення експериментальних досліджень

3.1.1 Вимоги до вимірювальних приміщень

При вимірюванні звукоізоляції експерименти можуть проводитися як у лабораторних, так і у натурних умов. Для кожного з типів вимірювань існують вимоги.

Якщо розглядати лабораторні умови вимірювань, то приміщення повинні складатися з двох суміжних приміщень з загальною стіною або підлогою, в залежності від того, який тип шуму є досліджуваним (повітряний – перегородкою або ударний – перекриттям). За своїми акустичними властивостями обидва приміщення повинні бути ревербераційними, тобто мати високий рівень реверберації. загальна стіна повинна мати проріз для встановлення зразків що досліджуються (двері, вікна, перегородки, тощо). Об'єми приміщень повинні бути не меншими за 50 м³, при цьому об'єми камер повинні відрізнятися не менше ніж на 10% по об'єму. Конструктивні огорожувальні елементи (стіни, підлога, стеля) повинні мати поверхневу густину не меншу за 500 кг/м². Згідно з ДСТУ Б В.2.6-86:2009 звукове поле у приміщеннях повинно бути дифузним. Тобто звукова енергія в приміщенні камери повинна бути максимально рівномірно розподілена. Мінімальну необхідні дифузність поля ми можемо отримати при умові що різниця між рівнями звукового тиску, виміряними у всіх обраних точках приміщення, не перевищувала 5 дБ на частотах до 200 Гц і 3 дБ на більш високих частотах нормованого частотного діапазону. Час реверберації у приміщенні низького рівня повинен бути не менше ніж одна секунду у всіх смугах частот. Час реверберації на низьких частотах повинен знаходитися у наступних межах:

$$1 \leq T_2 \leq 2 \sqrt[3]{\left(\frac{V}{50}\right)^2}, \quad (3.1)$$

Де V – об'єм приміщення низького рівня.

Як було зазначено вище: загальна стіна може мати проріз. Площа цього прорізу також має мінімальні значення. Для стін, перегородок – не менше 10 м^2 , для перекритті від 10 м^2 до 20 м^2 . Мінімальна довжини однієї із сторін прорізу повинна бути $2,3 \text{ м}$. Звукоізоляція стін камер повинна бути не менше ніж на 6 дБ більшою за звукоізоляції випробуваного зразка (конструкції).

Для натурних вимірювань вимоги дещо інші. Також як і для лабораторних вимірювань, приміщення повинні бути суміжними та мати загальну стінку (по вимірювання повітряного шуму) або загальну підлогу-стелю (для вимірювання ударного шуму). Об'єми приміщень високого та низького рівнів повинні бути не менше за 25 м^3 , а лінійні розміри не меншими за $2,3 \text{ м}$. Якщо на об'єкти об'єми приміщень різні, то більше з них потрібно використовувати як приміщення високого рівня. Площа випробуваної конструкції повинна бути не меншою за 10 м^2 .

Експериментальні дослідження проводилися згідно до ДСТУ Б В.2.6-86:2009. За цією методикою приміщення для вимірювання ізоляції повітряного шуму внутрішніми огорожувальними конструкціями склалися з двох суміжних по горизонталі приміщень між якими знаходиться досліджувана конструкція. Приміщення з більшим об'ємом використовувалась як приміщення високого рівня. Для засобів вимірювальної техніки були дотримані вимоги описані далі. Використовувався генератор шуму з діапазоном від 20 Гц до 15000 Гц , підсилювач потужності обраний згідно з ГОСТ 24388, гучномовці з робочим діапазоном 50 Гц до 10000 Гц з нерівномірністю частотної характеристики не більше 15 дБ . Вимірювальний мікрофон 1 класу точності з номінальним діапазоном від 30 Гц до 18000 Гц згідно з ГОСТ 6495. Вся вимірювальна техніка мала чанні свідоцтва про державну повірку.

Між джерелом шуму та огорожувальною конструкцією відстань дотримувалася не більше 1м, але не менше 0,5 м, в залежності від умов на об'єкті.

Вимірювання проводилися у шести точках рівномірно розподілених по всьому об'єму приміщення. Відстань від огорожувальних конструкцій до мікрофону підтримувалась 0,5 м. Точки розташування мікрофонів (точки вимірювання) між собою були на відстані 0,7 м.

Згідно з п.6.1.8 ДСТУ Б В.2.6-86:2009 вимірювання проводяться у третиннооктавних смугах у діапазоні частот 100, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1000, 1250, 1600, 2000, 2500, 3150 Гц.

Ізоляцію повітряного шуму огорожувальною конструкцією R , дБ, визначають у кожній смузі частот за формулою:

$$R = L_1 - L_2 + 10 \lg \left(\frac{S}{A_2} \right), \quad (3.2)$$

де L_1 – середній рівень звукового тиску в приміщенні високого рівня, дБ;

L_2 – середній рівень звукового тиску в приміщенні низького рівня, дБ;

S – площа поверхні випробуваної конструкції, m^2 ;

A_2 – еквівалентна площа звукопоглинання в приміщенні, m^2 .

Стандартизовану різницю рівнів звукового тиску визначають у кожній смузі частот за формулою:

$$D_{nT} = L_1 - L_2 + 10 \log \left(\frac{T_2}{T_0} \right), \quad (3.3)$$

де L_1 – середній рівень звукового тиску в приміщенні високого рівня, дБ;

L_2 – середній рівень звукового тиску в приміщенні низького рівня, дБ;

T_2 – час реверберації в приміщенні низького рівня, сек;

T_0 – величина стандартного часу реверберації і дорівнює 0,5 сек.

Приведену різницю рівнів звукового тиску визначають у кожній смузі частот за формулою:

$$D_n = L_1 - L_2 + 10 \log \left(\frac{A_0}{A_2} \right), \quad (3.4)$$

де L_1 – середній рівень звукового тиску в приміщенні високого рівня, дБ;

L_2 – середній рівень звукового тиску в приміщенні низького рівня, дБ;

A_2 – еквівалентна площа звукопоглинання в приміщенні, m^2 ;

A_0 – величина стандартної еквівалентної площі звукопоглинання і дорівнює $10m^2$.

3.1.2 Експериментальні дослідження. Загальні дані

Дослідження проводилося відповідно до протоколу випробувань ДСТУ Б В.2.6-86:2009 для випробування передачі звуку в повітрі стіновими конструкціями. Об'єкт відповідає всім вимогам ДСТУ Б В.2.6-86:2009. Детальнішу інформацію дивись попередній розділ. Випробування проводилися у вимірювальному комплексі ДП НДІБК. Зразки матеріалів були розміщені у випробувальній рамі з отвором для випробувань 2,5 м завширшки та 1,5 м заввишки між двома розділеними кімнатами з об'ємом $187 m^3$ та $140 m^3$ (позначається «велика камера» та «мала камера» відповідно). На рисунку 3.1 схематично зображено лабораторні камери для вимірювання звукоізоляції конструкцій. Об'єкт обладнаний автоматизованою звуковою та вимірювальною системою для збору та постобробки даних. Втрати при передачі звуку вимірювалися в обох напрямках, від великої камери до малої камери та навпаки, і результати, були усереднені, щоб зменшити невизначеність вимірювань через можливі помилки калібрування.

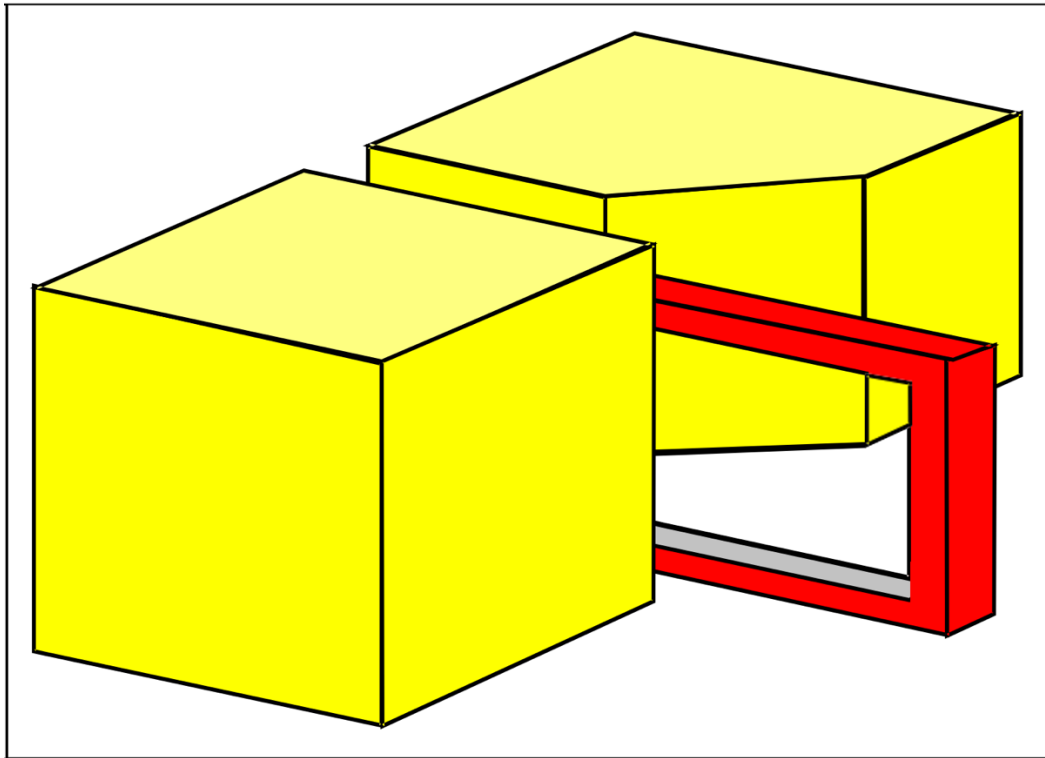


Рис. 3.1 Концептуальне креслення стінового об'єкта передачі звуку в лабораторному корпусі. Зразок був встановлений між двома суміжними по горизонталі звукомірними камерами.

Амплітудно частотні залежності звукоізоляції були виміряні для всіх частот у 1/3-октавних смугах у розширеному діапазоні частот від 31,5 Гц до 10 кГц, хоча для розрахунку звукоізоляції використовується спектр частот 200-3150 Гц.

Звичайною практикою в житлових будинках є додавання оздоблювальних поверхонь до основних конструкційних елементів (кладки або бетонних стін). Наприклад, поверхні стін і стелі з гіпсокартону, які приховують голі бетонні поверхні, будівельні комунікації (електропроводка, водопровідні труби і вентиляційні канали). Гіпсокартоне оздоблення зазвичай включає гіпсокартонні панелі, металевий каркас, який використовується для їх підтримки, і часто звукопоглинальний матеріал, який заповнює повітряний простір між гіпсокартоном і поверхнею конструктивного елементу. Ці елементи описані в ISO 15712-1 як

«облицювання» або «вкладиші», «шари» або «покриття». У цьому звіті використовується перший термін – «облицювання».

Щоб охарактеризувати зміну втрат при передачі звуку (рівень звукоізоляції) внаслідок додавання звукоізоляційного облицювання до існуючої стіни/перегородки (наприклад стіни з бетонних блоків), вводиться єдиний рейтинговий показник, який називається ΔR_w (ΔSTC). Показник ΔR_w є постійним у стандартах ISO 140-16 та ISO 15712-1 Процедура, використана в цьому звіті, відповідає процедурі ISO 140-16 [25] з розрахунком ΔSTC .

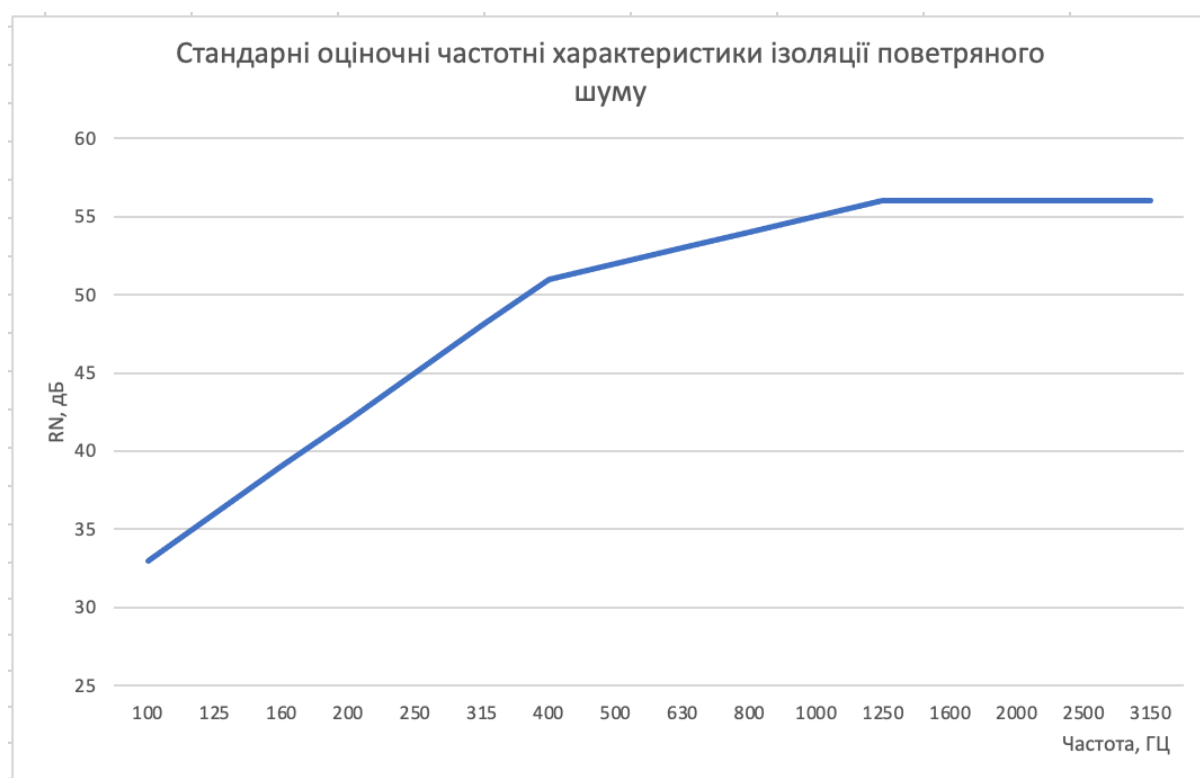


Рисунок 3.2 Стандартні оціночні частотні характеристики ізоляції повітряного шуму R_N

Втрати при передачі звуку (індекс ізоляції повітряного шуму) вимірюються згідно з ДСТУ Б В.2.6-85:2009 як для певної базової стіни (наприклад, стіни з бетонних блоків), так і для базової стіни з доданим облицювання з одного та/або з обох конструкцій. Дані про втрати передачі (в 1/3-октавних діапазонах) обробляються наступним чином:

Індекс ізоляції повітряного шуму R'_w огорожувальної конструкції з відомою (виміряною або розрахованою) частотною характеристикою ізоляції повітряного шуму R' визначається шляхом порівняння цієї частотної характеристики зі стандартною оціночною частотною характеристикою ізоляції повітряного шуму R_N . [17] (табл. 3.1).

Величини стандартної оціночної частотної характеристики в третиннооктавних смугах частот у нормованому діапазоні від 100 Гц до 3150 Гц (16 третиннооктавних смуг) і величини стандартної оціночної частотної характеристики в октавних смугах частот у нормованому діапазоні від 125 Гц до 2000 Гц (5 октавних смуг) наведені в таблиці 13 і на рисунку 3.2.

Таблиця 3.1 – Числові величини стандартних оціночних частотних характеристик ізоляції повітряного шуму

| Середньгеометричні частоти третиннооктавних (октавних) смуг, Гц | Числові величини стандартних оціночних частотних характеристик ізоляції повітряного шуму R_N , дБ | |
|--|---|--------------------------|
| | в третиннооктавних смугах частот | в октавних смугах частот |
| 100 | 33 | |
| 125 | 36 | 36 |
| 160 | 39 | |
| 200 | 42 | |
| 250 | 45 | 45 |
| 315 | 48 | |
| 400 | 51 | |
| 500 | 52 | 52 |
| 630 | 53 | |
| 800 | 54 | |
| 1000 | 55 | 55 |
| 1250 | 56 | |
| 1600 | 56 | |
| 2000 | 56 | 56 |
| 2500 | 56 | |
| 3150 | 56 | |
| Примітка. Частоти, наведені в дужках, відповідають середньгеометричним частотам октавних смуг | | |

Індекс ізоляції повітряного шуму R'_w визначається шляхом нанесення (накладання) на графік з оціночною характеристикою звукоізоляції R_N

графіка частотної характеристики ізоляції повітряного шуму цією конструкцією R' з подальшим визначенням середнього несприятливого відхилення частотної характеристики відного оціночної.

Вважаються небажаними розбіжності між характеристиками R_N і R' вниз від оціненої характеристики на окремих діапазонах частот. Середній небажаний відхил становить $1/16$ від суми всіх небажаних відхилів для розрахунків у третиннооктавних діапазонах частот і $1/5$ від суми всіх небажаних відхилів для розрахунків в октавних діапазонах частот.

Якщо середня величина небажаного відхилення максимально наближається до 2 дБ або дорівнює 2 дБ, проте не перевищує цю величину, тоді величина індексу R'_W буде 52 дБ (числова величина ординати стандартної оціненої характеристики на середньгеометричній частоті 500 Гц).

Якщо середня величина небажаного відхилення перевищує 2 дБ, то оцінена характеристика повинна бути зміщена вниз на ціле число децибел, щоб середня величина небажаного відхилення від зміщеної оціненої характеристики знову не перевищувала 2 дБ, але наближалася до цієї величини.

В такому випадку за величину індексу R'_W береться числова величина ординати зміщеної вниз стандартної оціненої характеристики.

Якщо середня величина небажаного відхилення менше 2 дБ або немає небажаних відхилень, то оцінена характеристика повинна бути зміщена вгору на ціле число децибел, щоб середня величина небажаного відхилення від зміщеної оціненої характеристики максимально наближалася до 2 дБ, але не перевищувала цю величину.

У цьому випадку за величину індексу R'_W береться числова величина ординати зміщеної вгору стандартної оціненої характеристики на середньгеометричній частоті 500 Гц.

3.2 Експериментальні дослідження масивних огорожувальних конструкцій

Цей розділ присвячений результатам експериментів щодо звукоізоляції перегородок з бетонних блоків без додаткового облицювання.

При дослідженнях випробовувалися стіни з двох типів бетонних блоків:

1. Бетонні блоки товщиною 190 мм. з поверхневою монтажною масою 238 кг/м².
2. Бетонні блоки товщиною 140 мм. з поверхневою монтажною масою 134 кг/м².

Вимірювання проводилися з двох тестів на однакових зразках конструкції (табл. 3.2)

Таблиця 3.2 – Рівень звукоізоляції конструкції к бетонних блоків товщиною 190 мм, та поверхневою масою 238 кг/м²

| Середньогометричні частоти третиннооктавних (октавних) смуг, Гц | Бетонні блоки 190 мм Поверхнева маса 238 кг/м ² Рівень звукоізоляції, дБ |
|---|---|
| 50 | 33 |
| 63 | 32 |
| 80 | 33 |
| 100 | 37 |
| 125 | 38 |
| 160 | 35 |
| 200 | 31 |
| 250 | 35 |
| 315 | 39 |
| 400 | 42 |
| 500 | 44 |
| 630 | 47 |
| 800 | 48 |
| 1000 | 51 |
| 1250 | 53 |
| 1600 | 56 |
| 2000 | 59 |
| 2500 | 58 |
| 3150 | 58 |
| 4000 | 60 |
| 5000 | 61 |
| R_w | 48 |

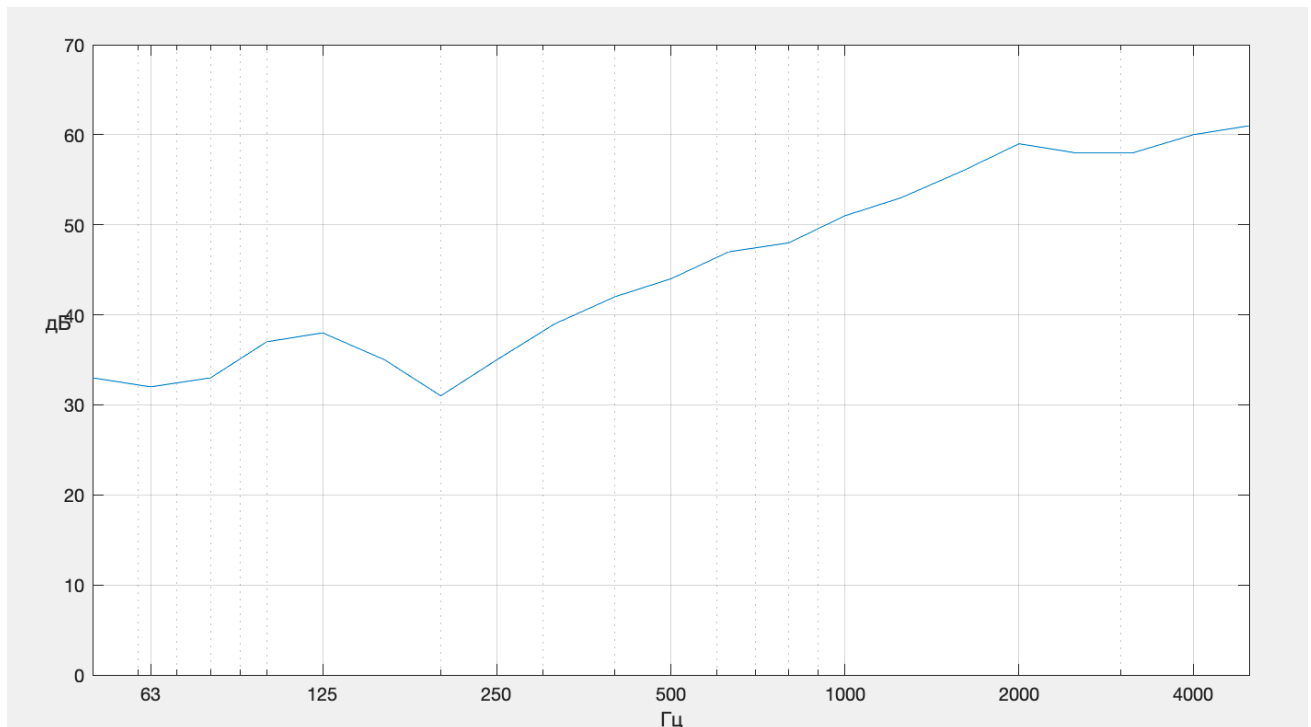


Рис. 3.3. Рівень звукоізоляції конструкції к бетонних блоків товщиною 190 мм, та поверхневою масою 238 кг/м²

Дві стінки мають подібні значення $R'w$, але криві втрат передачі помітно відрізняються на частотах від 100 до 400 Гц, де на результати для таких стінок найбільше впливають крайові умови. Кожен результат є дійсним результатом для умов випробувального зразка, але немає підстав стверджувати, що будь-який із них є більш репрезентативним (типовим) для очікуваної ефективності, коли стіна встановлена в будівлі.

Для стін, побудованих із блоків кладки з легких бетонних блоків, товщиною 140 мм та поверхневою масою 134 кг/м² та ущільнення поверхонь фарбою призвело до помітної зміни результатів $R'w$, як зазначено у табл. 15. У цьому випадку було проведено три (по суті ідентичних) випробування зразка стіни. Середнє значення трьох результатів $R'w$ для) показано у табл. 3.3 для порівняння з досить різними результатами при фарбуванні фарбою з одного або обох боків стіни.

Таблиця 3.3 Рівень звукоізоляції конструкції к бетонних блоків товщиною 140 мм, та поверхневою масою 134 кг/м²

| Середньгеометричні частоти третиннооктавних (октавних) смуг, Гц | Бетонні блоки 140 мм Поверхнева маса 134 кг/м ² | | |
|---|---|-------------------------------|----------------------------|
| | Рівень звукоізоляції, дБ | | |
| | Не пофарбований | Пофарбований з однієї сторони | Пофарбований з двох сторін |
| 50 | 24 | 27 | 27 |
| 63 | 22 | 26 | 26 |
| 80 | 18 | 24 | 25 |
| 100 | 19 | 23 | 26 |
| 125 | 22 | 26 | 28 |
| 160 | 21 | 27 | 30 |
| 200 | 23 | 28 | 29 |
| 250 | 24 | 29 | 29 |
| 315 | 27 | 29 | 29 |
| 400 | 29 | 32 | 35 |
| 500 | 31 | 35 | 38 |
| 630 | 33 | 38 | 39 |
| 800 | 37 | 40 | 42 |
| 1000 | 38 | 42 | 42 |
| 1250 | 39 | 44 | 47 |
| 1600 | 40 | 45 | 49 |
| 2000 | 36 | 42 | 46 |
| 2500 | 37 | 43 | 47 |
| 3150 | 41 | 49 | 50 |
| 4000 | 43 | 52 | 55 |
| 5000 | 45 | 53 | 56 |
| R_w | 35 | 39 | 41 |

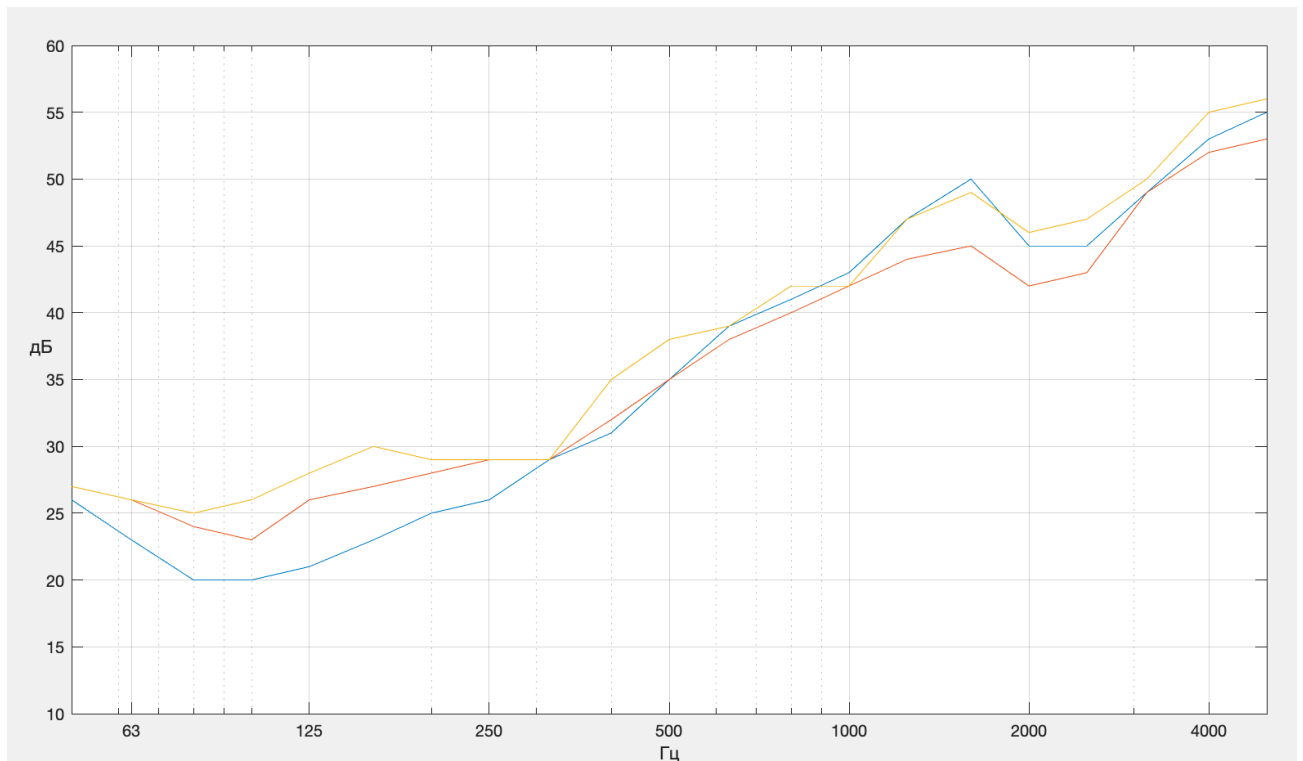


Рис. 3.4 Рівень звукоізоляції конструкції к бетонних блоків товщиною 140 мм, та поверхневою масою 134 кг/м^2 (синя лінія – не пофарбовано; червона – пофарбовано з однієї сторони; жовта – пофарбовано з двох сторін).

Фарбування для герметизації однієї сторони збільшило значення R_w з 35 дБ до 39 дБ. Менші зміни внаслідок фарбування з двох сторін підвищили значення R_w ще більше до 41 дБ. Для цієї порожнистої стіни з легкого бетонного блоку було зроблено висновок, що значні витоки звукової потужності відбуваються через пористу цементно-наповнювальну матрицю, якщо блоки не було герметизовано. Подібна картина покращення спостерігалася, коли голу стіну звукоізолювали обшивкою з гіпсокартону на дерев'яному каркасі, як показано у розділі 3.3.

3.3 Дослідження конструкції масивних стін з обшивками

У цьому розділі представлені результати вимірювань звукопередачі для серії зразків стін, що складаються з газобетонних блоків, з звукоізоляційним облицюванням за однієї або двох сторін.

3.3.1 Базові конструкції

До базових конструкцій належать конструкції, що складаються з її з бетонних блоків (далі будуть розглянуті бетонні блоки товщиною 190 мм. з поверхневою монтажною масою 238 кг/м^2 та бетонні блоки товщиною 140 мм. з поверхневою монтажною масою 134 кг/м^2) з облицюванням гіпсокартоном що кріпиться до дерев'яної або металевої обрешітки з/без заповнення акустичною ватою. До варіантів облицювань також входить залежність від кількості шарів гіпсокартону, товщини повітряного проміжку та товщини пружного наповнювача.

Таблиця 3.4 – Рівень звукоізоляції конструкції к бетонних блоків товщиною 190 мм, та поверхневою масою 238 кг/м² за звукоізоляційним облицюванням.

| Середньгеометричні частоти третиннооктавних (октавних) смуг, Гц | Рівень звукоізоляції, дБ | |
|---|--|---|
| | Облицювання одним шаром гіпсокартону на дерев'яній обрешітці 38мм з однієї сторони | Облицювання одним шаром гіпсокартону на дерев'яній обрешітці 38мм з обох сторін |
| 50 | 32 | 30 |
| 63 | 31 | 30 |
| 80 | 30 | 29 |
| 100 | 29 | 22 |
| 125 | 32 | 21 |
| 160 | 34 | 25 |
| 200 | 35 | 31 |
| 250 | 41 | 45 |
| 315 | 42 | 47 |
| 400 | 42 | 41 |
| 500 | 46 | 46 |
| 630 | 47 | 48 |
| 800 | 48 | 52 |
| 1000 | 53 | 56 |
| 1250 | 58 | 60 |
| 1600 | 61 | 63 |
| 2000 | 61 | 59 |
| 2500 | 60 | 59 |
| 3150 | 61 | 63 |

| | | |
|----------------------|-----------|-----------|
| 4000 | 65 | 67 |
| 5000 | 68 | 70 |
| R_w | 50 | 45 |

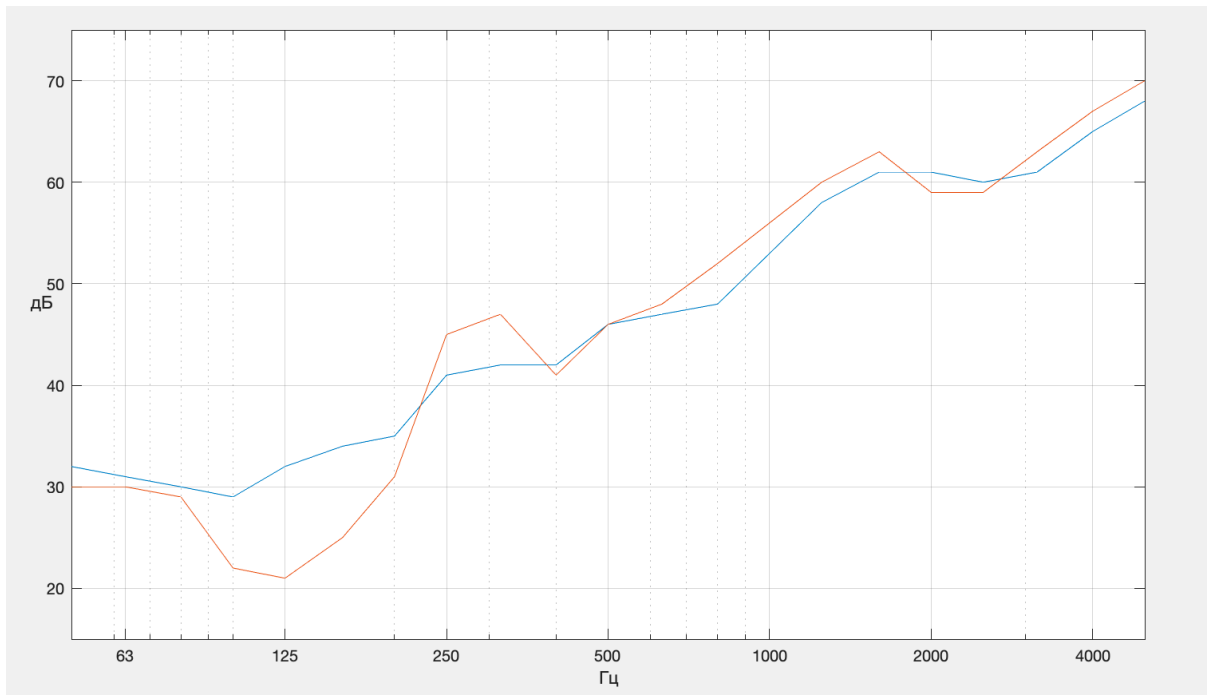


Рис. 3.5 Рівень звукоізоляції конструкції к бетонних блоків товщиною 190 мм, та поверхневою масою 238 кг/м² за звукоізоляційним облицюванням. (синім облицювання з однієї сторони; червоним облицювання з двох сторін)

З наведених значень таблиці та графіка, можна зауважити, що нерівномірність зростання почастотних індексів, значення можна умовно розділити на два сегменти, а саме – низькі частоти (до 200 Гц), та високі частоти (від 200 Гц). Слід зауважити, що в випадку облицювання з обох сторін спостерігається погіршення звукоізоляційних властивостей конструкції на частотах нижче 200 Гц. Це пов'язано з резонансними явищами, які виникають та посилюються через повітряний проміжок між шаром гіпсокартону та існуючою перегородкою. Ці впливи можна виправити, шляхом заповнення цього проміжку поглинаючим матеріалом. Приклади та результати наведені нижче у відповідному розділі.

Таблиця 3.5 – Рівень звукоізоляції конструкції к бетонних блоків товщиною 140 мм, та поверхневою масою 134 кг/м² за звукоізоляційним облицюванням.

| Середньгеометричні частоти третиннооктавних (октавних) смуг, Гц | Рівень звукоізоляції, дБ | |
|---|--|---|
| | Облицювання одним шаром гіпсокартону на дерев'яній обрешітці 38мм з однієї сторони | Облицювання одним шаром гіпсокартону на дерев'яній обрешітці 38мм з обох сторін |
| 50 | 27 | 27 |
| 63 | 24 | 24 |
| 80 | 19 | 19 |
| 100 | 19 | 19 |
| 125 | 24 | 29 |
| 160 | 29 | 32 |
| 200 | 31 | 35 |
| 250 | 39 | 44 |
| 315 | 38 | 43 |
| 400 | 38 | 40 |
| 500 | 40 | 43 |
| 630 | 42 | 45 |
| 800 | 48 | 49 |
| 1000 | 50 | 52 |
| 1250 | 55 | 60 |
| 1600 | 59 | 63 |
| 2000 | 53 | 59 |
| 2500 | 52 | 54 |
| 3150 | 57 | 60 |

| | | |
|----------------------|-----------|-----------|
| 4000 | 62 | 64 |
| 5000 | 63 | 68 |
| R_w | 44 | 48 |



Рис. 3.6 Рівень звукоізоляції конструкції к бетонних блоків товщиною 140 мм, та поверхневою масою 134 кг/м² за звукоізоляційним облицюванням. (червоним – облицювання з однієї сторони, синім – з двох сторін)

З наведених значень таблиці та графіка, можна зауважити, що зростання почастотних індексів умовно співпадають з законом мас. При подвоєнні маси перегородки – індекс звукоізоляції збільшується на 2-3 дБ, що ми і бачимо в результатах. Причина того, що закон мас працює в цій системі полягає в тому, що маса бетонних блоків 140мм з поверхневою масою 134 кг/м² майже рівна масі доданого звукоізоляційного облицювання.

3.3.2 Вплив товщини звукопоглинаючого матеріалу (вати) між обшивкою та стіною

Так як система звукоізоляції складається з системи типу «маса-пружина-маса», а при проектуванні звукоізоляційних рішень найчастіше використовується система додаткової звукоізоляції (звукоізоляційне облицювання), то необхідно розглянути варіації систем. Під варіаціями мається на увазі різновидність елементів облицюванні. У наступних таблицях буде розглянуто варіації облицювань з змінними товщинами звукопоглинаючого матеріалу (вати).

У таблицях 3.6-3.8 наведено значення рівнів звукоізоляції конструкцій з загальним показником товщини початкової конструкції (існуючої перегородки) та варіантами типових рішень що до звукоізоляції таких конструкцій.

Таблиця 3.6 – Рівень звукоізоляції конструкції з газобетонних блоків товщиною 100 мм, та поверхневою масою 40 кг/м² з звукоізоляційним облицюванням одним шаром гіпсокартону з однієї сторони на металевому профілі з різним за товщиною шаром звукопоглинального матеріалу.

| Середньгеометричні частоти третиннооктавних (октавних) смуг, Гц | Рівень звукоізоляції, дБ | | |
|---|-------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| | Товщина звукоізоляційної вати 50 мм | Товщина звукоізоляційної вати 100 мм | Товщина звукоізоляційної вати 200 мм |
| 50 | 24 | 21 | 16 |
| 63 | 23 | 18 | 17 |
| 80 | 23 | 20 | 25 |
| 100 | 19 | 26 | 32 |
| 125 | 24 | 33 | 38 |
| 160 | 30 | 37 | 42 |
| 200 | 33 | 40 | 44 |
| 250 | 31 | 36 | 37 |
| 315 | 34 | 34 | 34 |
| 400 | 37 | 37 | 37 |
| 500 | 40 | 40 | 40 |
| 630 | 43 | 43 | 43 |
| 800 | 45 | 45 | 45 |
| 1000 | 48 | 48 | 48 |
| 1250 | 51 | 51 | 51 |
| 1600 | 53 | 53 | 53 |
| 2000 | 55 | 55 | 55 |
| 2500 | 56 | 56 | 56 |
| 3150 | 55 | 55 | 55 |

| | | | |
|----------------------|-----------|-----------|-----------|
| 4000 | 71 | 71 | 71 |
| 5000 | 75 | 75 | 75 |
| R_w | 43 | 45 | 46 |

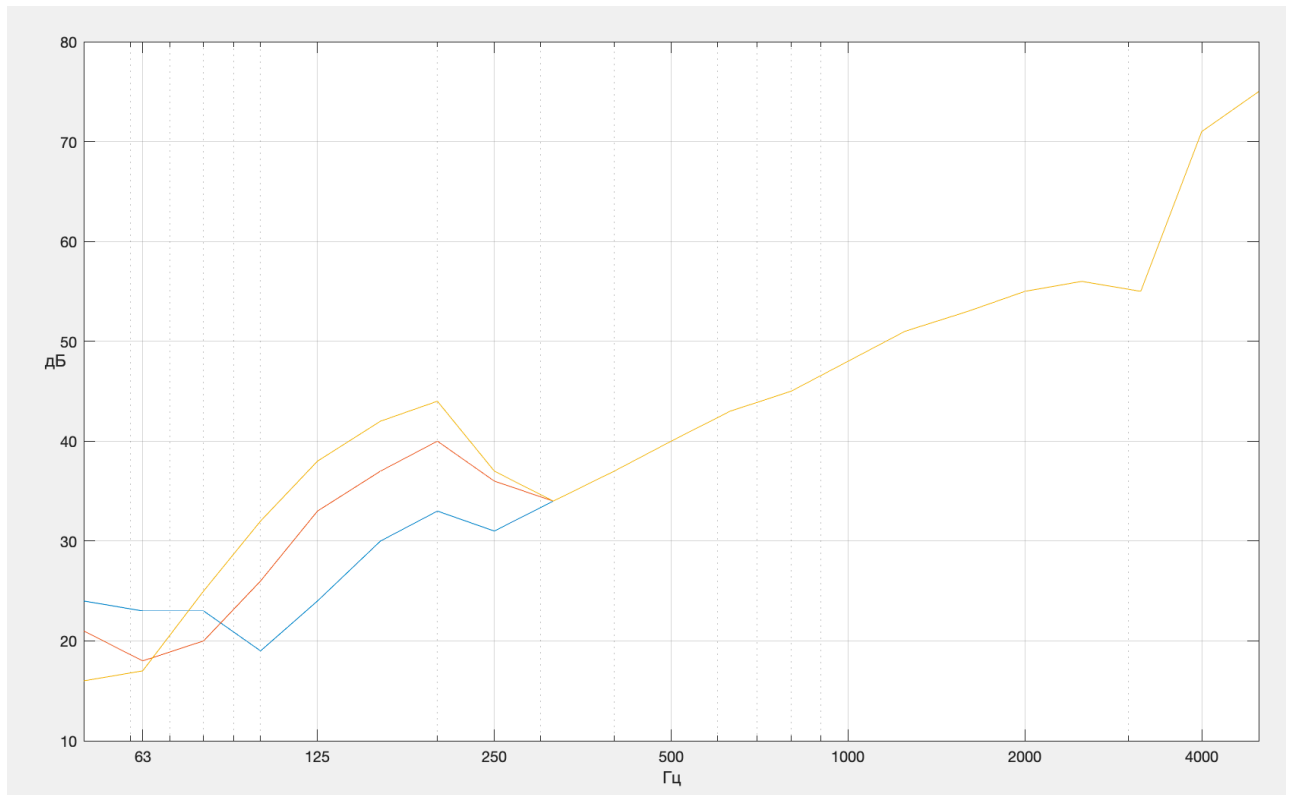


Рис 3.7 Рівень звукоізоляції конструкції з газобетонних блоків товщиною 100 мм, та поверхневою масою 40 кг/м² з звукоізоляційним облицюванням одним шаром гіпсокартону з однієї сторони на металевому профілі з різним заповненням звукопоглинаючого матеріалу (синя лінія – 50 мм; червона – 100 мм; жовта – 200 мм).

Зміна товщини звукопоглинаючого матеріалу всередині конструкції призводить до позитивних змін в значеннях індексів звукоізоляції в середньгеометричних смугах частот. Істотні зміни помітні на низьких частотах (до 250 Гц), що відповідає формулі (20), яка враховує товщину заповнення та фізичні характеристики матеріалу. Різниця значень у 3-5 дБ є нормальною, так як товщина матеріалів в зразках змінюється у два рази відповідно до попереднього зразка.

Таблиця 3.7 – Рівень звукоізоляції конструкції з газобетонних блоків товщиною 200 мм, та поверхневою масою 80 кг/м² з звукоізоляційним облицюванням одним шаром гіпсокартону з однієї сторони на металевому профілі з різним за товщиною шаром звукопоглинального матеріалу.

| Середньгеометричні частоти третиннооктавних (октавних) смуг, Гц | Рівень звукоізоляції, дБ | | |
|---|-------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| | Товщина звукоізоляційної вати 50 мм | Товщина звукоізоляційної вати 100 мм | Товщина звукоізоляційної вати 200 мм |
| 50 | 28 | 25 | 19 |
| 63 | 27 | 20 | 22 |
| 80 | 23 | 24 | 29 |
| 100 | 21 | 29 | 34 |
| 125 | 22 | 29 | 33 |
| 160 | 31 | 32 | 32 |
| 200 | 34 | 35 | 35 |
| 250 | 38 | 38 | 38 |
| 315 | 40 | 41 | 41 |
| 400 | 43 | 43 | 43 |
| 500 | 46 | 46 | 46 |
| 630 | 49 | 49 | 49 |
| 800 | 52 | 52 | 52 |
| 1000 | 54 | 54 | 54 |
| 1250 | 57 | 57 | 57 |
| 1600 | 59 | 59 | 59 |
| 2000 | 61 | 61 | 61 |
| 2500 | 62 | 62 | 62 |
| 3150 | 61 | 61 | 61 |
| 4000 | 80 | 80 | 80 |

| | | | |
|----------------------|-----------|-----------|-----------|
| 5000 | 84 | 84 | 84 |
| R_w | 47 | 49 | 49 |

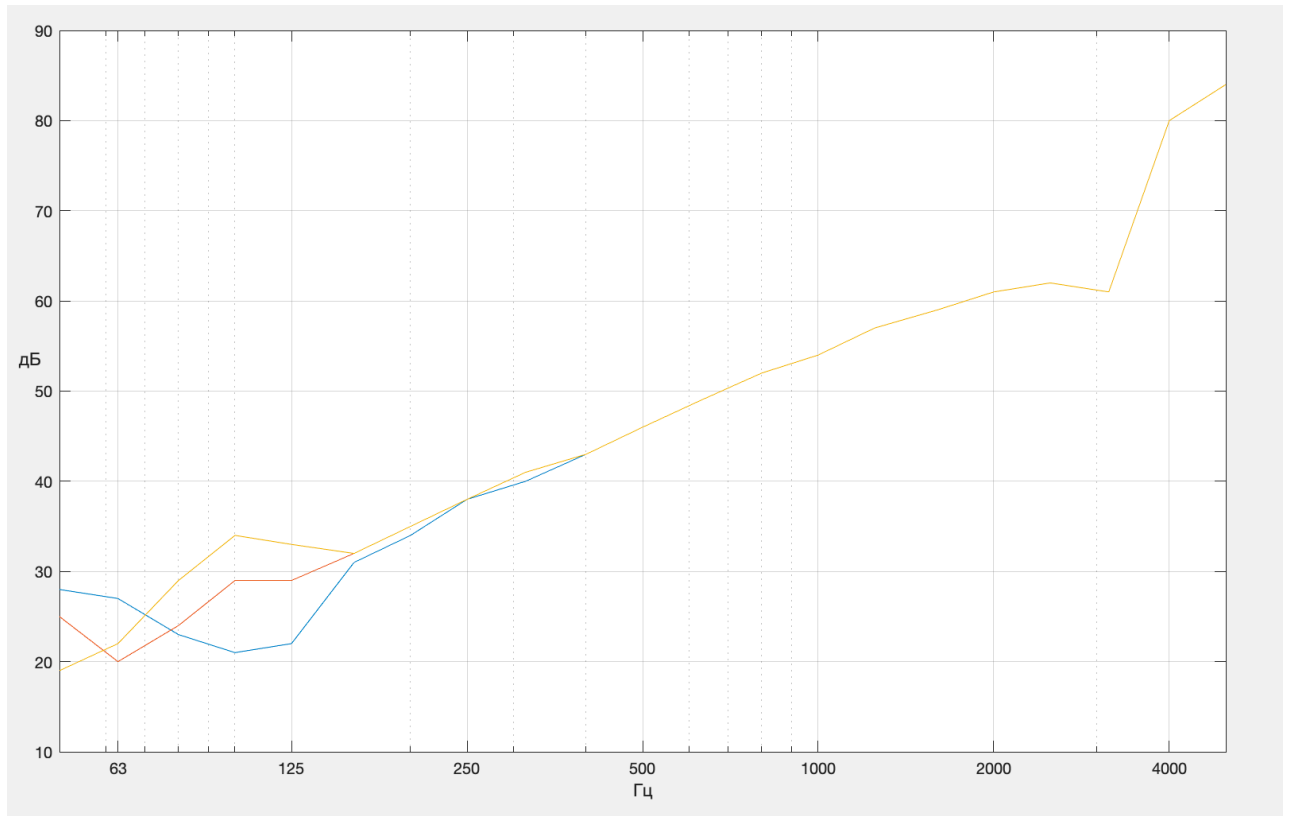


Рис. 3.8 Рівень звукоізоляції конструкції з газобетонних бетонних блоків товщиною 200 мм, та поверхневою масою 80 кг/м² з звукоізоляційним облицюванням одним шаром гіпсокартону з однієї сторони на металевому профілі з різним за товщиною наповненням звукопоглинаючого матеріалу. (синя лінія – 50 мм; червона – 100 мм; жовта – 200 мм).

Отримані значення подібні до тих, що описані вище. Збільшення товщини звукопоглинаючого матеріалу позитивно впливає на значення звукоізоляції на низьких частотах.

Таблиця 3.8 – Рівень звукоізоляції конструкції з газобетонних блоків товщиною 300 мм, та поверхневою масою 120 кг/м² з звукоізоляційним облицюванням одним шаром гіпсокартону з однієї сторони на металевому профілі з різним за товщиною шаром звукопоглинального матеріалу.

| Середньгеометричні частоти третиннооктавних (октавних) смуг, Гц | Рівень звукоізоляції, дБ | | |
|---|-------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| | Товщина звукоізоляційної вати 50 мм | Товщина звукоізоляційної вати 100 мм | Товщина звукоізоляційної вати 200 мм |
| 50 | 30 | 27 | 21 |
| 63 | 27 | 21 | 23 |
| 80 | 19 | 22 | 27 |
| 100 | 26 | 30 | 31 |
| 125 | 31 | 33 | 34 |
| 160 | 35 | 36 | 37 |
| 200 | 39 | 39 | 39 |
| 250 | 42 | 42 | 42 |
| 315 | 45 | 45 | 45 |
| 400 | 47 | 48 | 48 |
| 500 | 50 | 50 | 50 |
| 630 | 53 | 53 | 53 |
| 800 | 56 | 56 | 56 |
| 1000 | 58 | 58 | 58 |
| 1250 | 61 | 61 | 61 |
| 1600 | 63 | 63 | 63 |
| 2000 | 65 | 65 | 65 |
| 2500 | 66 | 66 | 66 |
| 3150 | 65 | 65 | 65 |
| 4000 | 85 | 85 | 86 |

| | | | |
|----------------------|-----------|-----------|-----------|
| 5000 | 89 | 89 | 90 |
| R_w | 52 | 53 | 53 |

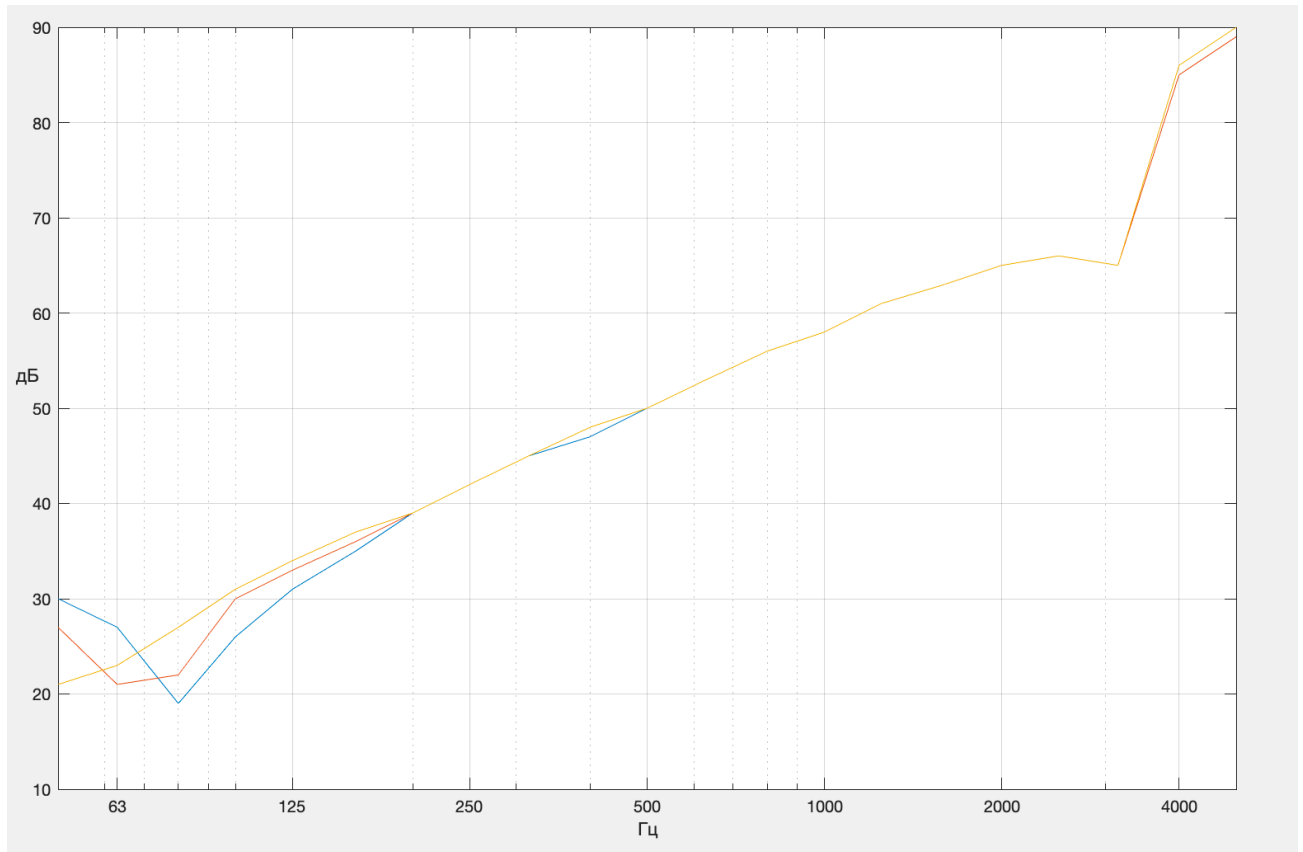


Рис. 3.9 Рівень звукоізоляції конструкції з газобетонних блоків товщиною 300 мм, та поверхневою масою 120 кг/м² з звукоізоляційним облицюванням одним шаром гіпсокартону з однієї сторони на металевому профілі з різним за товщиною шаром звукопоглинального матеріалу. (синя лінія – 50 мм; червона – 100 мм; жовта – 200 мм).

3.3.3 Вплив кількості шарів обшивки на збільшення звукоізоляції

Для збільшення маси конструкції можливо також використовувати двійне або потрійне облицювання звукоізоляційної конструкції. Таким чином ми збільшимо масу всієї поверхні, що призведе до збільшення індексу звукоізоляції всієї конструкції в цілому.

У таблицях нижче наведені варіанти з однаковими початковими перегородками (існуючі стіни) з варіантами різних кількостей шарів гіпсокартону.

Таблиця 3.9 – Рівень звукоізоляції конструкції з газобетонних блоків товщиною 100 мм, та поверхневою масою 40 кг/м² із звукоізоляційним облицюванням із гіпсокартону з однієї сторони на металевому профілі з заповненням акустичною ватою товщиною 50мм.

| Середньгеометричні частоти третиннооктавних (октавних) смуг, Гц | Рівень звукоізоляції, дБ | | |
|---|---|--|--|
| | Кількість шарів гіпсокартону: один Товщина одного шару гіпсокартону 12,5 мм | Кількість шарів гіпсокартону: два Товщина одного шару гіпсокартону 12,5 мм | Кількість шарів гіпсокартону: три Товщина одного шару гіпсокартону 12,5 мм |
| 0 | 24 | 23 | 23 |
| 63 | 23 | 20 | 17 |
| 80 | 23 | 18 | 21 |
| 100 | 19 | 25 | 29 |
| 125 | 24 | 31 | 35 |
| 160 | 30 | 36 | 40 |
| 200 | 33 | 39 | 42 |
| 250 | 31 | 35 | 37 |
| 315 | 34 | 34 | 35 |
| 400 | 37 | 37 | 38 |
| 500 | 40 | 40 | 41 |
| 630 | 43 | 43 | 44 |
| 800 | 45 | 46 | 46 |
| 1000 | 48 | 49 | 49 |
| 1250 | 51 | 51 | 52 |
| 1600 | 53 | 54 | 54 |
| 2000 | 55 | 56 | 56 |

| | | | |
|----------------------|-----------|-----------|-----------|
| 2500 | 56 | 57 | 57 |
| 3150 | 55 | 56 | 56 |
| 4000 | 71 | 72 | 72 |
| 5000 | 75 | 76 | 76 |
| R_w | 43 | 45 | 46 |

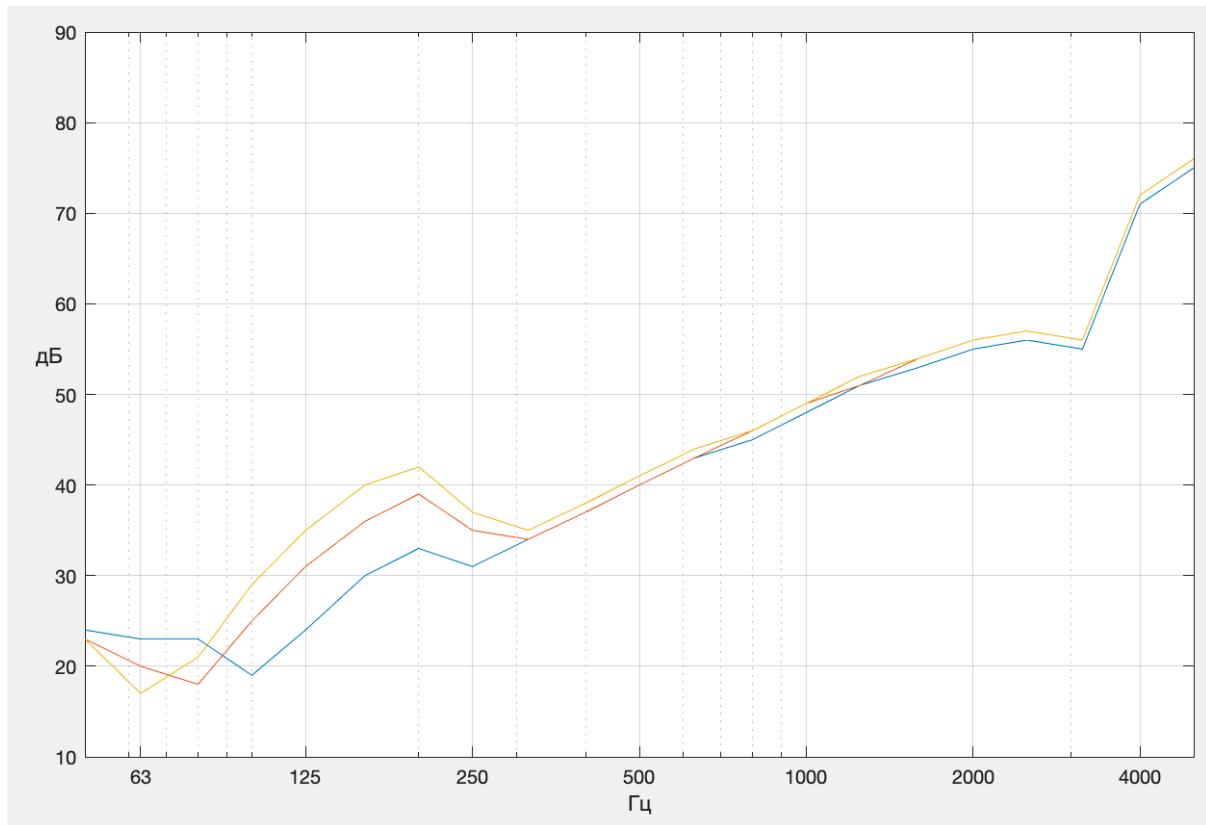


Рис. 3.10 Рівень звукоізоляції конструкції з газобетонних бетонних блоків товщиною 100 мм, та поверхневою масою 40 кг/м² з звукоізоляційним облицюванням з гіпсокартону з однієї сторони на металевому профілі з заповненням акустичною ватою товщиною 50мм.
(синім – 1 шар, червоним – 2 шар, жовтим – 3 шари)

Таблиця 3.10 Рівень звукоізоляції конструкції з газобетонних блоків товщиною 100 мм, та поверхневою масою 40 кг/м² з звукоізоляційним облицюванням з гіпсокартону з однієї сторони на металевому профілі з заповненням акустичною ватою товщиною 100мм.

| Середньгеометрич ні частоти третиннооктавних (октавних) смуг, Гц | Рівень звукоізоляції, дБ | | |
|---|--|---|---|
| | Кількість шарів гіпсокартону: один Товщина одного шару гіпсокартону 12,5 мм | Кількість шарів гіпсокартону: два Товщина одного шару гіпсокартону 12,5 мм | Кількість шарів гіпсокартону: три Товщина одного шару гіпсокартону 12,5 мм |
| 50 | 21 | 15 | 14 |
| 63 | 18 | 18 | 22 |
| 80 | 20 | 27 | 30 |
| 100 | 26 | 34 | 37 |
| 125 | 33 | 39 | 42 |
| 160 | 37 | 43 | 45 |
| 200 | 40 | 45 | 47 |
| 250 | 36 | 38 | 38 |
| 315 | 34 | 34 | 35 |
| 400 | 37 | 37 | 38 |
| 500 | 40 | 40 | 41 |
| 630 | 43 | 43 | 44 |
| 800 | 45 | 46 | 46 |
| 1000 | 48 | 49 | 49 |
| 1250 | 51 | 51 | 52 |
| 1600 | 53 | 54 | 54 |
| 2000 | 55 | 56 | 56 |
| 2500 | 56 | 57 | 57 |
| 3150 | 55 | 56 | 56 |
| 4000 | 71 | 72 | 72 |
| 5000 | 75 | 76 | 76 |
| R_w | 45 | 46 | 46 |

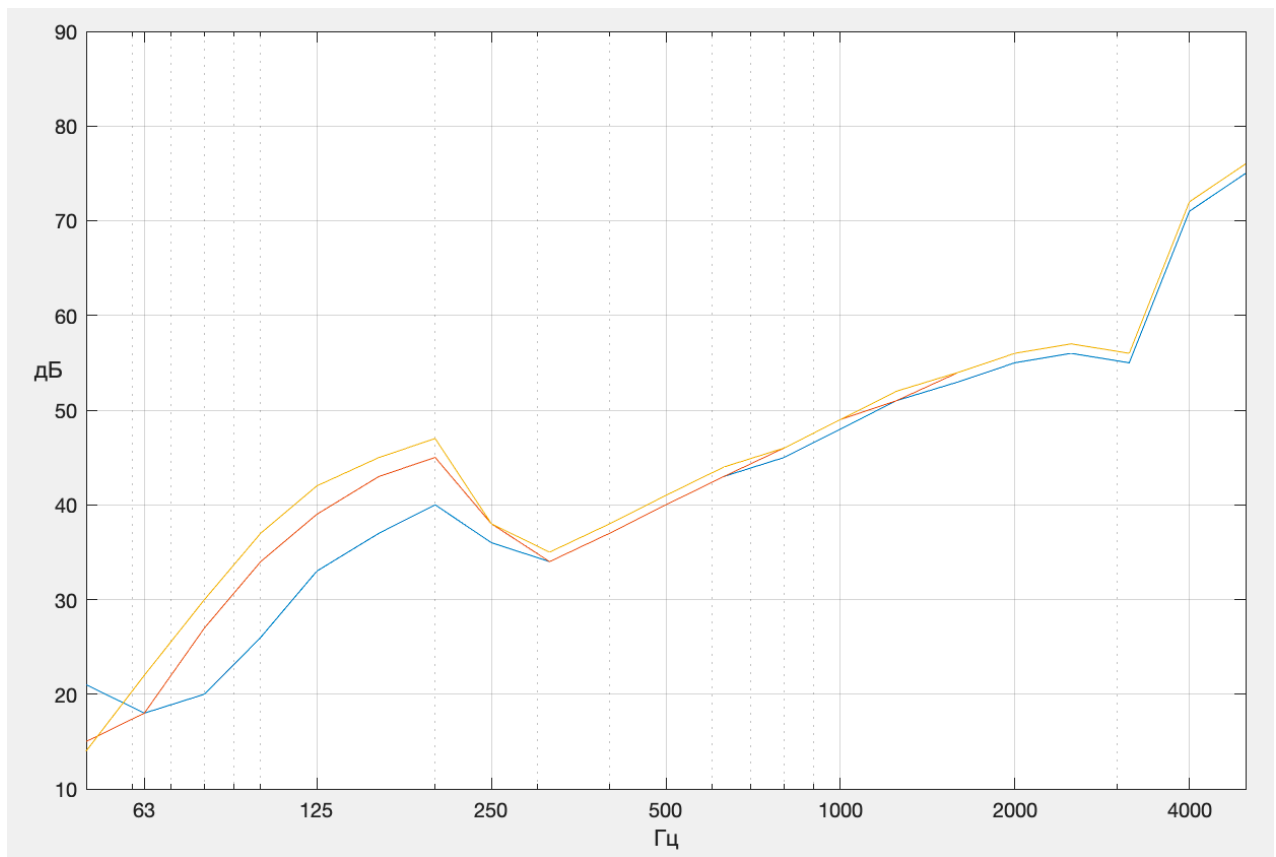


Рисунок 3.11 Рівень звукоізоляції конструкції з газобетонних блоків товщиною 100 мм, та поверхневою масою 40 кг/м^2 з звукоізоляційним облицюванням з гіпсокартону з однієї сторони на металевому профілі з заповненням акустичною ватою товщиною 100мм. (синім – 1 шар, червоним – 2 шар, жовтим – 3 шари)

3.4 Висновки до розділу 3

1. Рівень звукоізоляції конструкції з бетонних блоків товщиною 195 мм та густиною 238 кг/м^3 вищий за рівень звукоізоляції бетонних блоків товщиною 140 мм та густиною 134 кг/м^3 на 13 дБ середньому. Тобто у такому випадку спрацьовує закон мас.

2. Фарбування більш легких конструкцій з одного або двох боків підвищує рівень звукоізоляції з 35 дБ до 39 дБ, при однобічному фарбуванні, та з 35 дБ до 41 дБ при двосторонньому фарбуванні. Що вже на 9 дБ, при односторонньому, та 13 дБ, при двосторонньому фарбуванні, відрізняється від значень більш важких конструкцій.

3. Для покращення звукоізоляції легких конструкцій можна рекомендувати фарбувати їх з 2-х сторін. Так як значні витоки звукової енергії відбуваються через пористу цементнонаповнену матрицю матеріалу.

4. Рівень звукоізоляції легких конструкцій (140 мм та густиною 134 кг/м³) можна значно покращити використовуючи однобічне облицювання шаром гіпсокартону на дерев'яному каркасі. Значення індексу звукоізоляції такої конструкції становить $R_w = 44$ дБ. При використанні облицювання з двох сторін досягається індекс звукоізоляції $R_w = 48$ дБ. При цьому значення індексу звукоізоляції більш важких конструкцій (товщиною 190 мм та густиною 238 кг/м³) сягає $R_w = 48$ дБ, що є рівним значенню двобічного облицювання легкої конструкції.

5. Збільшення товщини звукопоглинаючих матеріалів у конструкції позитивно впливає на низькі частоти. Так збільшення товщини звукоізоляційної вати з 50 мм до 200 мм призводить до збільшення рівня звукоізоляції з $R_w = 21$ дБ до $R_w = 34$ дБ на частоті 100 Гц. Тобто використання ефективного звукопоглинаючого матеріалу в конструкції дає $\Delta R_w = 13$ дБ.

6. Додавання додаткових шарів гіпсокартону в звукоізоляційному облицюванні може суттєво покращити індекс звукоізоляції цієї конструкції. Кожен додатковий шар гіпсокартону може призвести до збільшення індексу звукоізоляції на приблизно +2-3 децибела (дБ), що є значущим покращенням. Так, наприклад, при облицюванні бетонних блоків товщиною 100 мм та поверхневою масою 40 кг/м² одним шаром гіпсокартону $R_w = 43$ дБ, з двома шарами $R_w = 45$ дБ, з трьома $R_w = 46$ дБ.

4 МЕТОД РОЗРАХУНКУ ЗВУКОІЗОЛЯЦІЇ МАСИВНИХ ОГОРОДЖЕНЬ З ЛИСТОВИМ ОБЛИЦЮВАННЯМ НА ОСНОВІ КАРКАСУ

4.1 Метод розрахунку звукоізоляції багатошарових конструкцій

Враховуючи вищезазначений огляд літератури, експериментальні та змодельовані далі запропонована методика для розрахунку звукоізоляції будівельних конструкцій, тип яких зазначений на рис. 10. У магістерській роботі автора була запропонована методика для розрахунку звукоізоляції. Для розрахунків розділимо цю конструкцію на два шари. Перший шар – існуюча конструкція з твердих матеріалів (бетону, цегляної кладки тощо). Другий шар – матеріал облицювання з поглинанням (гіпсоволокнисті плити, керамзитні плити, плити на основі кварцевого піску тощо + мінеральна вата, базальтова вата, войлок тощо). Як висновок – у роботі вперше розроблений та запропонований графічний метод визначення звукоізоляції багатошарової конструкції з різними класами матеріалів.

Грунтуючись на відомих формулах та методів розрахунків розроблена методика має наступний вигляд:

$$\left[\begin{array}{ll} R = R_1 + R_2 + C_{1,2} & f \leq 250 \\ R = R_1 + R_2 + C_{1,2} - 9 & 250 \geq f \leq 2500 \text{ Гц} \\ R = R_1 + R_2 + C_{1,2} + 9 & f \geq 2500 \text{ Гц} \end{array} \right. \quad (4.1)$$

де R_1 – індекс звукоізоляції на певній частоті існуючої конструкції з твердих матеріалів (бетону, цегляної кладки тощо), тобто, зазначеного вище, першого (існуючого, масивного) «шару» конструкції, дБ; R_2 – індекс звукоізоляції другого «шару» конструкції, відповідно, дБ; C – додатковий коефіцієнт поправки, дБ.

Коефіцієнт C розраховується за наступними формулами:

$$C_1 = 10 \lg \left(\frac{m_1 + 2m_2}{f(h_2 + h_2)} \right) - 20 \lg \left(\frac{m_1}{m_2} \right), \quad (4.2)$$

$$C_2 = 10 \lg \left(\frac{m_1 + 2m_2}{f(h_2 + h_2)} \right) - 10 \lg (R_1 - R_2), \quad (4.3)$$

m_1 – поверхнева маса першого (існуючого, масивного) «шару» будівельної конструкції, кг/м²; m_2 – поверхнева маса другого (додаткової звукоізоляції) «шару» будівельної конструкції, кг/м²; h_1 – товщина першого «шару» будівельної конструкції, м; h_2 – товщина другого «шару» будівельної конструкції, м; f – частота на якій проводяться розрахунки, згідно третиннооктавної полоси частот, Гц.

Зазначимо, що кожна система рівнянь релевантна для різних поверхневих мас існуючої конструкції, першого «шару».

Так, система рівнянь C_1 (4.2) відповідає будівельній конструкції в якій поверхнева маса існуючої перегородки, першого «шару», лежить в проміжку 100...400 кг/м². Показники нижче 100 кг/м² не доречно розглядати через низькі показники, та такі матеріали не повинні використовуватися в звукоізоляційних цілях. Тобто її доречно використовувати для матеріалів, поверхнева маса яких менше ніж 400 кг/м². Система рівнянь з використанням коефіцієнта C_2 (4.3) релевантна, в свою чергу, для матеріалів, поверхнева маса яких більша 400 кг/м².

Показники R_1 та R_2 розраховуються відповідно до пунктів зазначених нижче. Частотну характеристику R , дБ визначають у графічний спосіб, будуючи криву ACBD як наведено на рис. 4.1.

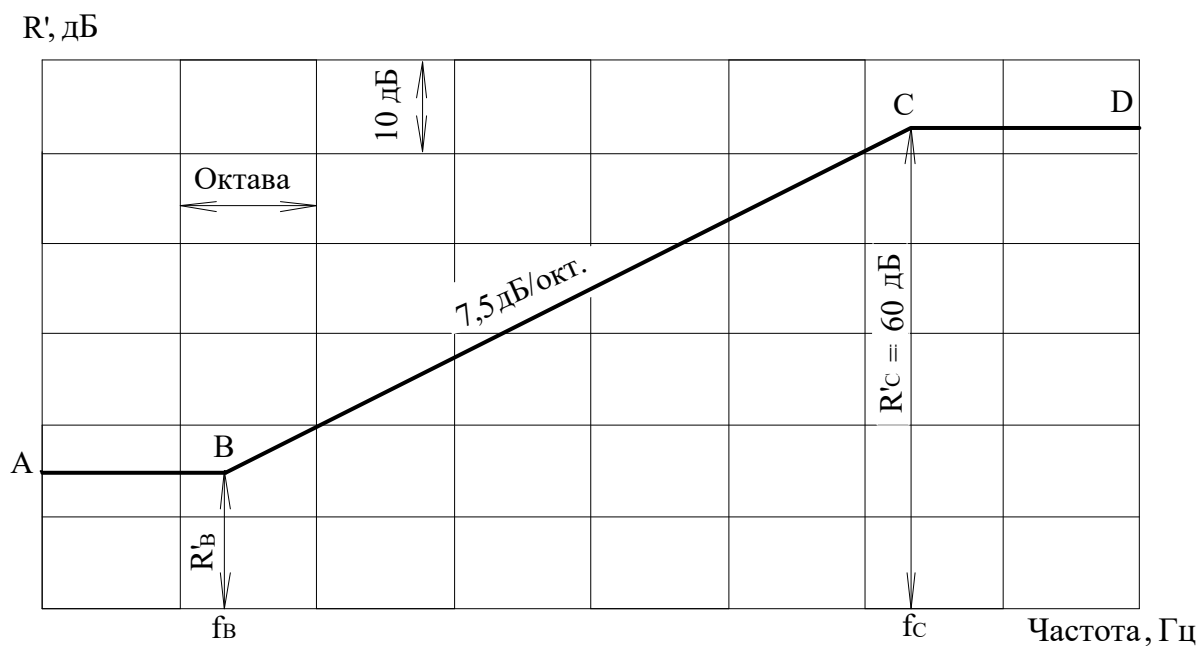


Рисунок 4.1 Частотна характеристика ізоляції повітряного шуму акустично однорідною огорожувальною конструкцією

Частоту f_B (абсцису точки В) визначають в залежності від товщини огорожувальної конструкції згідно з 4.4.а-4.4. ж:

$$f_B = 164 - 120 \lg h_n \quad \text{при} \quad \rho \geq 1800 \text{ кг/м}^3, \quad (4.4.а)$$

$$f_B = 159 - 120 \lg h_n \quad \text{при} \quad \rho = 1700 \text{ кг/м}^3, \quad (4.4.б)$$

$$f_B = 154 - 120 \lg h_n \quad \text{при} \quad \rho = 1600 \text{ кг/м}^3, \quad (4.4.в)$$

$$f_B = 149 - 120 \lg h_n \quad \text{при} \quad \rho = 1500 \text{ кг/м}^3, \quad (4.4.г)$$

$$f_B = 144 - 120 \lg h_n \quad \text{при} \quad \rho = 1400 \text{ кг/м}^3, \quad (4.4.д)$$

$$f_B = 139 - 120 \lg h_n \quad \text{при} \quad \rho = 1300 \text{ кг/м}^3, \quad (4.4.е)$$

$$f_B = 134 - 120 \lg h_n \quad \text{при} \quad \rho \leq 1200 \text{ кг/м}^3, \quad (4.4.ж)$$

де h_n – товщина огорожувальної конструкції, м;

ρ – густина (об'ємна маса) матеріалу конструкції, кг/м³.

Отримане значення заокруглюють до середньгеометричної частоти третиннооктавної смуги частот.

Ординату точки В, яка є величиною звукоізоляції R'_B , дБ, визначають за формулою:

$$R'_B = 21 \lg m - 14, \quad (4.5)$$

де m – поверхнева густина огорожувальної конструкції, кг/м².

Отриману величину R'_B заокруглюють до 0,5 дБ.

Далі із точки В вліво проводять горизонтальний відрізок ВА, а вправо від точки В проводять ВС з нахилом 7,5 дБ на октаву до точки С з ординатою $R'_C = 60$ дБ. Із точки С вправо проводять горизонтальний відрізок CD. Якщо точка С лежить за межами нормованого частотного діапазону звукоізоляції (частота $f_C \geq 3150$ Гц), то відрізок CD - відсутній.

Коефіцієнти С (4.2) (4.3) у собі мають логарифмічні вирази, які залежать від h та m – товщин та мас шарів, відповідно. Ці коефіцієнти необхідні для анулювання ефекту резонансу у системі облицювання. Таким чином ми можемо визначати вплив звукопоглинальних матеріалів на звукоізоляційні характеристики багатошарових конструкцій

Отримані значення для систем, які складаються з цегли 120 мм + 50 мм акустичної вати + 2 шари ГКЛ, другий тип цегла 240 мм + 50 мм акустичної вати + 2 шари ГКЛ, цегли 120 мм + 100 мм акустичної вати + 2 шари ГКЛ, другий тип цегла 240 мм + 100 мм акустичної вати + 2 шари ГКЛ наведено в табл. 14-17. Розрахунок систем проводився за формулами вказаними у (4.1), (4.2) та (4.3). Для зручності значення у таблицях 4.1-4.4 наведено у октавному спектрі частот. При розрахунках значення поверхневої маси цегли 120 мм була прийнята у 200 кг/м², поверхнева маса цегли 240 мм була прийнята у 400 кг/м², поверхнева маса двох шарів гіпсоволокнистих плит та вати, без залежності від товщини, була прийнята як 31 кг/м².

Таблиця 4.1 – частотна характеристика системи 120 мм цегла + 50 мм вата + 2 шари ГКЛ за експериментальними натурними даними

| | | | | | | | |
|---------------------------------|-----------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|
| Частота, Гц | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 |
| Рівень звукоізоляції, дБ | 44 | 48 | 44 | 52 | 62 | 67 | 74 |

Таблиця 4.2 – частотна характеристика системи 240 мм цегла + 50 мм вата + 2 шари ГКЛ за експериментальними натурними даними

| | | | | | | | |
|---------------------------------|-----------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|
| Частота, Гц | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 |
| Рівень звукоізоляції, дБ | 53 | 57 | 56 | 63 | 72 | 76 | 87 |

Таблиця 4.3 – частотна характеристика системи 120 мм цегла + 100 мм вата + 2 шари ГКЛ за експериментальними натурними даними

| | | | | | | | |
|---------------------------------|-----------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|
| Частота, Гц | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 |
| Рівень звукоізоляції, дБ | 46 | 50 | 46 | 55 | 64 | 69 | 75 |

Таблиця 4.4 – частотна характеристика системи 240 мм цегла + 100 мм вата + 2 шари ГКЛ за експериментальними натурними даними

| | | | | | | | |
|---------------------------------|-----------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|
| Частота, Гц | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 |
| Рівень звукоізоляції, дБ | 52 | 56 | 55 | 63 | 72 | 75 | 87 |

Порівняння. На рис. 4.2-4.5 та табл. 4.5-4.8 зображено частотні характеристики для системи, що складається з цегли 120 мм + 50 мм акустичної вати + 2 шари ГКЛ, другий тип цегла 240 мм + 50 мм акустичної вати + 2 шари ГКЛ, цегли 120 мм + 100 мм акустичної вати + 2 шари ГКЛ, другий тип цегла 240 мм + 100 мм акустичної вати + 2 шари ГКЛ розраховані трьома методами: ПЗ Insul, натурним експериментами та запропонованою методикою.

Таблиця 4.5 – Порівняння частотних характеристик отриманих за допомогою ПЗ INSUL, експериментально натурними даними та за пропонованою методикою для конструкції з 120 мм цегла + 50 мм вата + 2 шари ГКЛ

| Середньгеометричні частоти третиннооктавних (октавних) смуг, Гц | Рівень звукоізоляції, дБ | | |
|---|--------------------------|-----------|------------------------|
| | Експериментальні данні | ПЗ INSUL | Запропонована методика |
| 63 | 23 | 28 | 44 |
| 80 | 34 | 33 | 45 |
| 100 | 43 | 40 | 47 |
| 125 | 45 | 46 | 48 |
| 160 | 46 | 50 | 46 |
| 200 | 47 | 50 | 45 |
| 250 | 47 | 46 | 44 |
| 315 | 47 | 49 | 46 |
| 400 | 48 | 51 | 50 |
| 500 | 54 | 54 | 52 |
| 630 | 56 | 57 | 56 |
| 800 | 62 | 59 | 59 |
| 1000 | 67 | 61 | 61 |
| 1250 | 65 | 64 | 65 |
| 1600 | 67 | 66 | 67 |
| 2000 | 67 | 68 | 66 |
| 2500 | 75 | 68 | 78 |
| 3150 | 78 | 67 | 75 |
| 4000 | 83 | 83 | 77 |
| R_w | 58 | 59 | 57 |

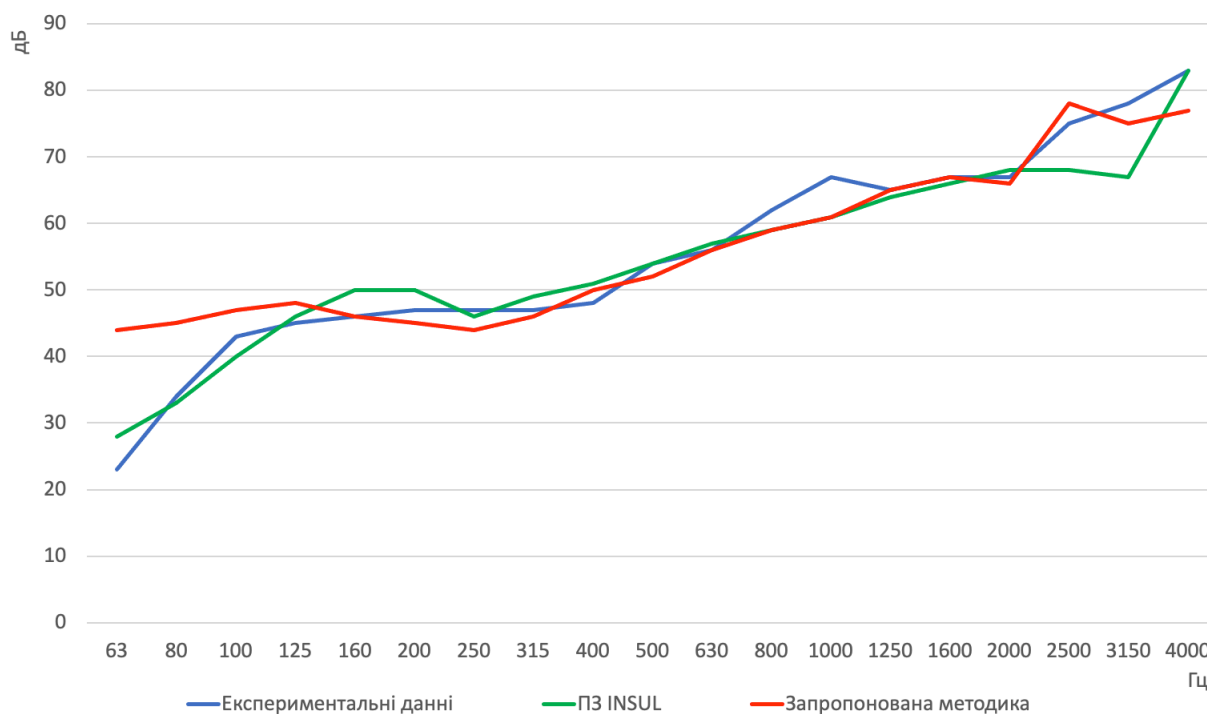


Рис. 4.2 Порівняння частотних характеристик отриманих за допомогою ПЗ INSUL, експериментально натурними даними та заборонованою методикою для конструкції з 120 мм цегла + 50 мм вата + 2 шари ГКЛ

Таблиця 4.6 – Порівняння частотних характеристик отриманих за допомогою ПЗ INSUL, експериментально натурними даними та заборонованою методикою для конструкції з 240 мм цегла + 50 мм вата + 2 шари ГКЛ

| Середньгеометричні частоти третиннооктавних (октавних) смуг, Гц | Рівень звукоізоляції, дБ | | |
|---|--------------------------|----------|------------------------|
| | Експериментальні данні | ПЗ INSUL | Запропонована методика |
| 63 | 30 | 32 | 54 |
| 80 | 30 | 37 | 55 |
| 100 | 49 | 43 | 56 |
| 125 | 50 | 46 | 57 |
| 160 | 56 | 49 | 57 |
| 200 | 57 | 52 | 56 |
| 250 | 53 | 55 | 56 |

| | | | |
|----------------------|-----------|-----------|-----------|
| 315 | 55 | 58 | 58 |
| 400 | 59 | 60 | 61 |
| 500 | 60 | 63 | 63 |
| 630 | 66 | 65 | 67 |
| 800 | 68 | 68 | 69 |
| 1000 | 71 | 70 | 71 |
| 1250 | 74 | 72 | 75 |
| 1600 | 74 | 74 | 78 |
| 2000 | 71 | 76 | 73 |
| 2500 | 76 | 76 | 88 |
| 3150 | 77 | 75 | 87 |
| 4000 | 88 | 94 | 88 |
| R_w | 65 | 67 | 65 |

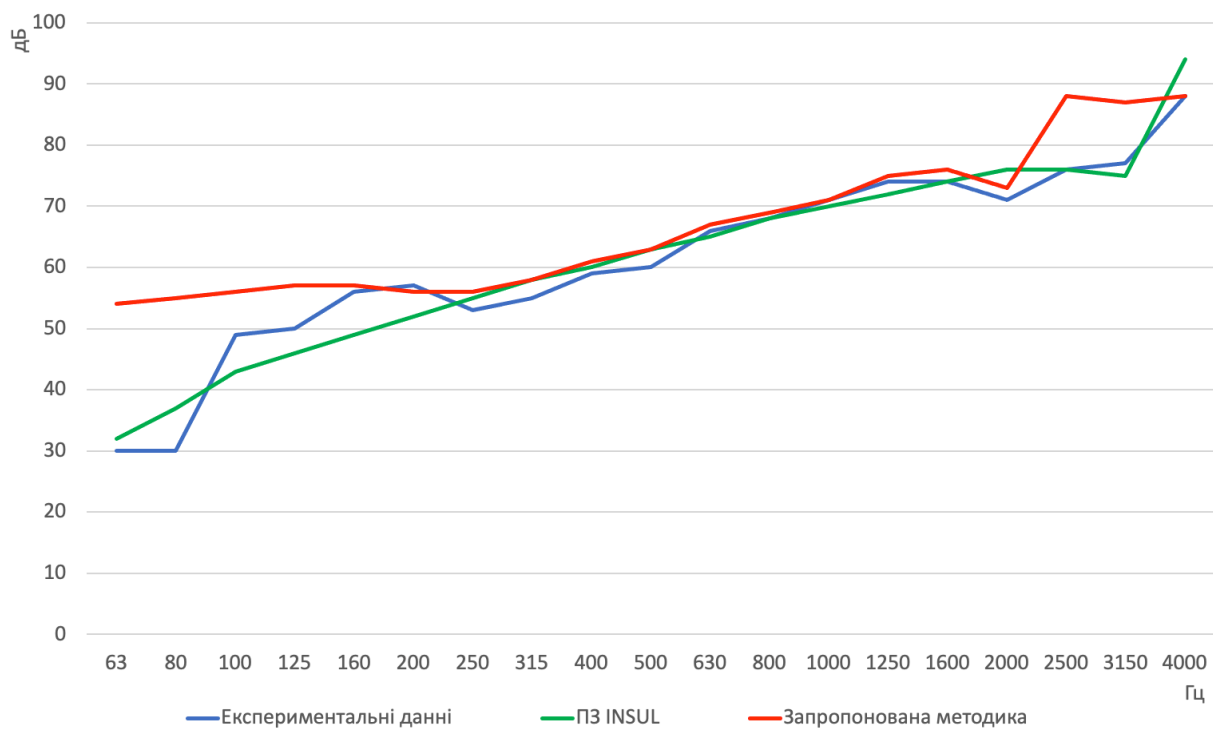


Рис. 4.3 Порівняння частотних характеристик отриманих за допомогою ПЗ INSUL, експериментально натурними даними та заборонованою методикою для конструкції з 240 мм цегла + 50 мм вата + 2 шари ГКЛ

Таблиця 4.7 – Порівняння частотних характеристик отриманих за допомогою ПЗ INSUL, експериментально натурними даними та заборонованою методикою для конструкції з 120 мм цегла + 100 мм вата + 2 шари ГКЛ

| Середньгеометричні частоти третиннооктавних (октавних) смуг, Гц | Рівень звукоізоляції, дБ | | |
|---|--------------------------|-----------|------------------------|
| | Експериментальні данні | ПЗ INSUL | Запропонована методика |
| 63 | 34 | 34 | 46 |
| 80 | 43 | 42 | 47 |
| 100 | 48 | 48 | 48 |
| 125 | 53 | 53 | 49 |
| 160 | 56 | 56 | 50 |
| 200 | 57 | 56 | 48 |
| 250 | 55 | 46 | 46 |
| 315 | 53 | 49 | 48 |
| 400 | 56 | 51 | 52 |
| 500 | 56 | 54 | 55 |
| 630 | 56 | 57 | 57 |
| 800 | 58 | 59 | 59 |
| 1000 | 61 | 61 | 64 |
| 1250 | 65 | 64 | 68 |
| 1600 | 67 | 66 | 70 |
| 2000 | 67 | 68 | 69 |
| 2500 | 77 | 68 | 79 |
| 3150 | 83 | 67 | 74 |
| 4000 | 88 | 83 | 78 |
| R_w | 61 | 59 | 60 |

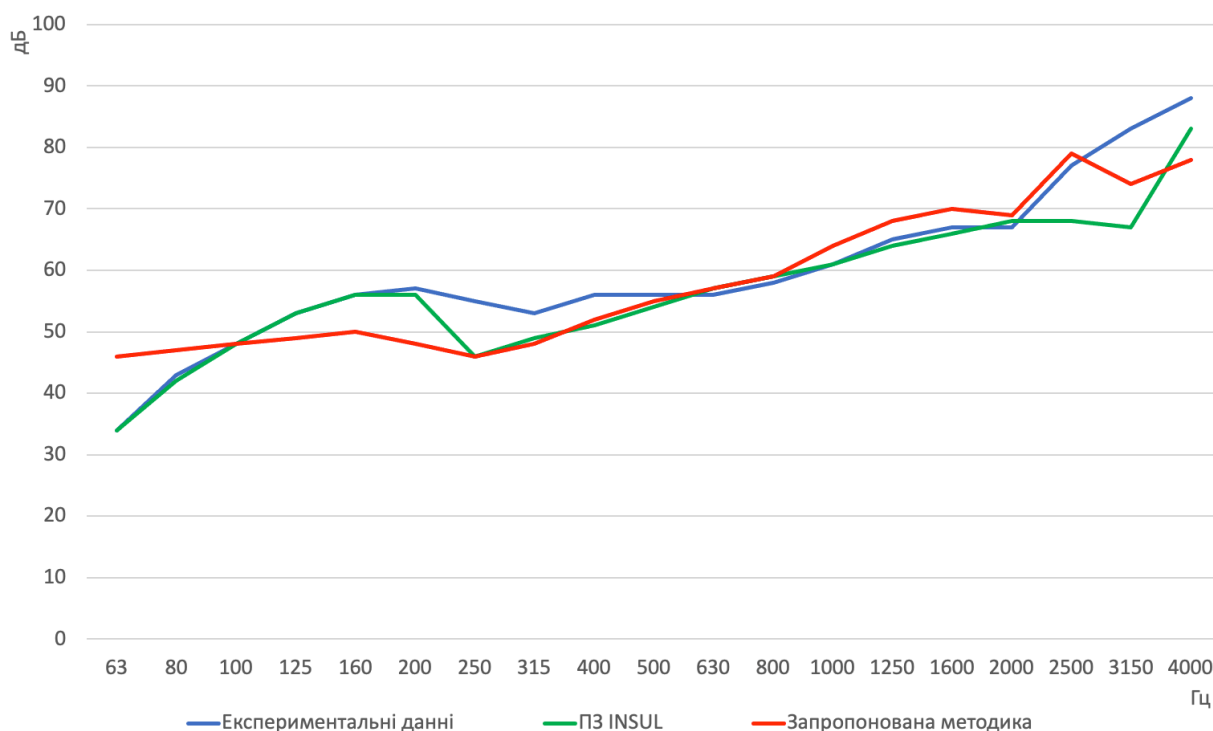


Рис. 4.4. Порівняння частотних характеристик отриманих за допомогою ПЗ INSUL, експериментально натурними даними та заборонованою методикою для конструкції з 120 мм цегла + 100 мм вата + 2 шари ГКЛ

Таблиця 4.8 – Порівняння частотних характеристик отриманих за допомогою ПЗ INSUL, експериментально натурними даними та заборонованою методикою для конструкції з 240 мм цегла + 100 мм вата + 2 шари ГКЛ

| Середньгеометричні частоти третиннооктавних (октавних) смуг, Гц | Рівень звукоізоляції, дБ | | |
|---|--------------------------|----------|------------------------|
| | Експериментальні данні | ПЗ INSUL | Запропонована методика |
| 63 | 39 | 39 | 53 |
| 80 | 47 | 46 | 54 |
| 100 | 54 | 51 | 55 |
| 125 | 57 | 47 | 56 |
| 160 | 59 | 50 | 57 |
| 200 | 58 | 53 | 56 |

| | | | |
|----------------------|-----------|-----------|-----------|
| 250 | 58 | 55 | 55 |
| 315 | 59 | 58 | 58 |
| 400 | 64 | 60 | 60 |
| 500 | 65 | 63 | 63 |
| 630 | 68 | 65 | 65 |
| 800 | 70 | 68 | 68 |
| 1000 | 73 | 70 | 73 |
| 1250 | 74 | 72 | 75 |
| 1600 | 77 | 74 | 78 |
| 2000 | 75 | 76 | 75 |
| 2500 | 77 | 76 | 86 |
| 3150 | 83 | 75 | 83 |
| 4000 | 88 | 89 | 86 |
| R_w | 70 | 66 | 67 |

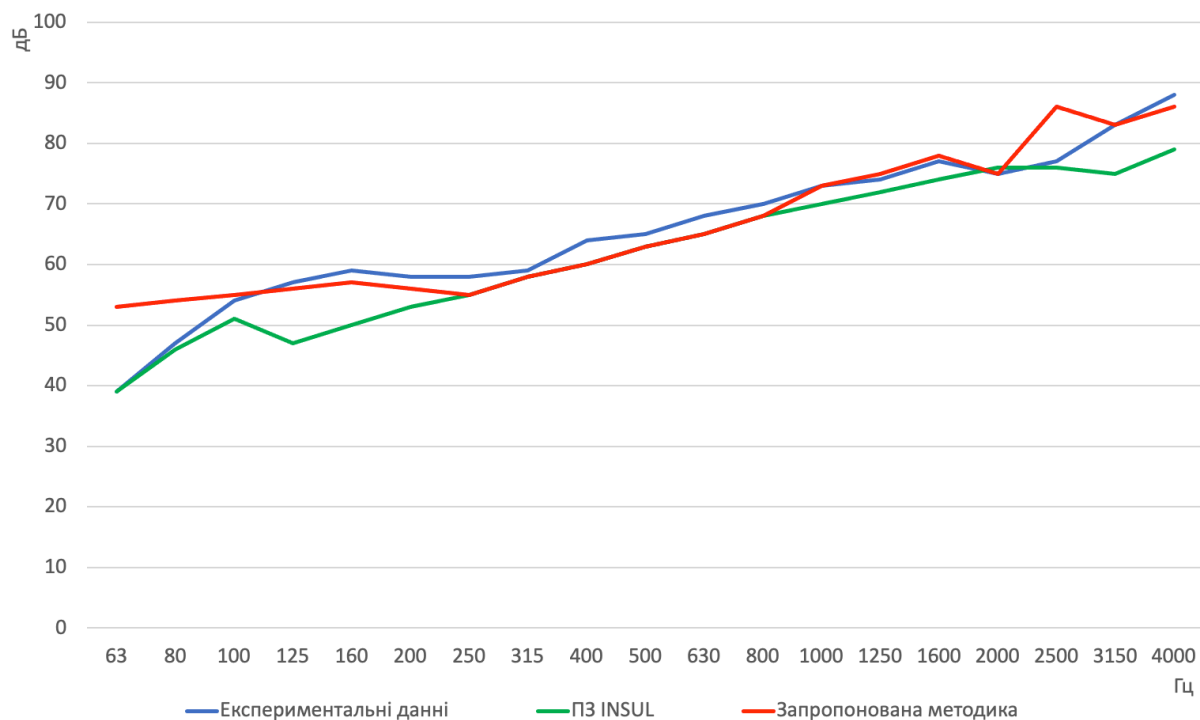


Рис. 4.5 Порівняння частотних характеристик отриманих за допомогою ПЗ INSUL, експериментально натурними даними та заборонованою методикою для конструкції з 240 мм цегла + 100 мм вата + 2 шари ГКЛ

4.2 Висновки до розділу 4

1. Розроблений метод розрахунку звукоізоляції є високонадійним та точним інструментом для аналізу та оцінки звукового перекриття в будівлях та конструкціях. Однією з ключових властивостей цієї нової методики є її відповідність результатам натурних експериментів.

2. Запропонована методика дозволяє за фізичними та геометричними властивостями огороження визначити його частотну характеристику звукопоглинання.

3. Розроблений метод розрахунку базується на відомих методах оцінки частотної характеристики звукоізоляції окремо для масивних акустично однорідних конструкцій та листових матеріалів. Однак основною перевагою даного методу стало те, що за допомогою введених коефіцієнтів вдалось оцінити взаємний вплив облицювання та масивної частини конструкції.

4. Для перевірки запропонованого методу було проведено числові та натурні експерименти, які показали відповідність (в межах ± 5 дБ) частотних характеристик звукоізоляції в діапазоні частот 200 – 3150 Гц.

Саме цей діапазон частот є «розмовним». Саме він є основною проблемою в побутовому плані.

5. Результати порівняння розрахункових величин індексів звукоізоляції отриманих з використанням запропонованого методу , та отриманих експериментальним шляхом, становить ± 3 дБ, що відповідає точності розрахунку з застосуванням програми INSU, що є світовим лідером в даній області.

6. Варто звернути увагу на невелику невідповідність значень на частотах 63 дБ – 125 дБ та 3150 дБ – 4000дБ. Вона виникає через у наслідок антропогенного впливу під час проведення експериментів та через недосконалість та помилки будівельників, що виконували роботи на об'єкті.

У контексті порівняння з існуючими формулами та програмним забезпеченням важливо відзначити відмінності. Існуючі підходи можуть

виявити значну похибку у відношенні до реальних експериментів. Це може бути пов'язано зі спрощеннями та узагальненнями, які використовуються в існуючих формулах, а також з обмеженою можливістю програмного забезпечення враховувати всі деталі конструкцій.

7. Основною відмінністю та вагомим фактором у коректності розробленої методики, в порівнянні з іншими, є урахування товщин, мас та щільності звукоізоляційної конструкції (див. коефіцієнти C_1 та C_2 у 4.2 та 4.3). Що дає можливість більш точно врахувати всі фізичні параметри використовуваних матеріалів.

ВИСНОВКИ

1. В роботі було розроблено графічний метод визначення частотної характеристики звукоізоляції багатошарової конструкції з різними класами матеріалів, що дозволило розраховувати індекси звукоізоляції масивних стін з каркасним облицюванням.

Розроблений метод дозволяє проводити оцінку звукоізоляційної здатності конструкцій в розширеному діапазоні частот 50 – 5000 Гц, що дозволяє розрахунковим методом визначати проникаючі рівні шуму в приміщення в октавних смугах з середньгеометричними частотами 63 – 4000 Гц. Такий діапазон частот відповідає вимогам нормативних документів.

2. Було проаналізовано та удосконалено метод визначення впливу звукопоглинальних матеріалів на звукоізоляційні властивості багатошарових конструкцій, що дозволило більш раціонально обирати звукопоглинальні матеріали за їх фізичними та геометричними характеристиками.

Показано що збільшення товщини звукопоглинального матеріалу з 50 мм до 100 мм в цілому призводить до збільшення індексу звукоізоляції на 2

дБ, та додатково ще на 1 дБ при збільшенні товщини звукопоглинального шару до 200 мм.

Недоліком же збільшення товщини звукопоглинального матеріалу є зменшення звукоізоляційної здатності конструкції на резонансній частоті, що лежить в області низьких частот 50 – 100 Гц. Таке явище може суб'єктивно погіршувати звукоізоляцію стіни, оскільки саме в цей діапазон частот є робочим діапазоном низькочастотних акустичних систем (сабвуферів).

3. Удосконалено метод визначення впливу повітряного проміжку на частотну характеристику масивної стіни з облицюванням листовими матеріалами, це дозволило показати, що облицювання з обох сторін листовими матеріалами з повітряним проміжком призводить до різкого зменшення звукоізоляційної здатності в області низьких частот.

Наявність незаповненого проміжку між листовим матеріалом та масивною частиною стіни призводить до виникнення резонансних явищ повітряного проміжку, що суб'єктивно погіршує звукоізоляційні характеристики огороження на величину до 3 дБ за індексом звукопоглинання. Тому в конструкціях з облицюванням масивної стіни листовими матеріалами по каркасу, завжди повітряний проміжок необхідно заповнювати високоефективним звукопоглинальним матеріалом.

4. Показано вплив каркасу облицювання на звукоізоляційні характеристики, це дозволило оцінити звукоізоляційні характеристики масивних стін з облицюванням на основі металевого каркасу.

5. Було визначено зміни частотних характеристик звукоізоляції багат шарових конструкцій з різних класів матеріалів, що дозволило визначити резонансні частоти таких конструкцій та визначити мінімуми звукоізоляції.

Порівняння частотних характеристик звукоізоляції багат шарових конструкцій, що отримані експериментальним шляхом та на основі

запропонованого методу показує велику узгодженість результатів в частотному діапазоні вище 125 Гц. На низьких частотах результати отримані розрахунковим шляхом є дещо вищими.

6. Розбіжність значень індексу звукоізоляції багатошарових конструкцій з облицюванням листовими матеріалами на основі металевого каркасу становить ± 2 дБ.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Eurostat, Housing Conditions Statistics. European Commission, 2013.
2. Preamble to the Constitution of the World Health Organization as adopted by the International Health Conference, New York, 19 - 22 June 1946; signed on 22 July 1946 by the representatives of 61 states (official *Records of the World Health Organization*, No. 2, p. 100) and entered into force on 7 April 1948.
3. Burden of disease from environmental noise - Quantification of healthy life years lost in Europe. World Health Organization (WHO). URL: <https://www.who.int/publications/i/item/9789289002295>
4. Van den Berg, M. "Neighbour Noise: A rational Approach", pp. 151-154 in *Proceedings of the 2nd WHO International Housing and Health Symposium*. WHO, Bonn (2004).
5. J Lang, R Pierrard, W Schönback, "Sound Insulation in Housing Construction", TU Wien, Vienna, July 2006. A summary is found in J Lang (2007), "*Schallschutz im Wohnungsbau*". WKSB 59/2007.
6. B Rasmussen, "Sound insulation between dwellings – Requirements in building regulations in Europe". *Applied Acoustics*, 2010, 71(4), 373-385. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apacoust.2009.08.011>
7. Eihler F. Schallschutz im bauwesen. Berlin, 1959
8. Дідковський В.С., Куньова С.А., Богданов О.С. Архітектурна акустика. Навчальний посібник. Київ, 2012.
9. F.Fahy, Sound and Structural Vibration Radiation, Transmission and Response, Academic Press, London, 1985.
10. L. Cremer, "Theorie der Schälldämmung dünner Wände bei Schrägen einfall", *Akust. Ztg*, 7, pp81 (1942).

- 11.E.C Sewell, "Transmission of reverberant sound through a single leaf partition surrounded by an infinite rigid baffle", Journal of Sound and Vibration 12 pp 21-32 (1970).
12. J.H. Rindel, "Sound Radiation from Building Structures and Acoustical Properties of Thick Plates", COMETT- SAVOIR Course, Noise Control in Buildings – Up-to-date Practice, CSTB, Grenoble, France (1995), pp 7-8.
- 13.B.H. Sharp, "Prediction Methods for the Sound Transmission of Building Elements, Noise Control Engineering 11, pp 63 – 63, (1978).
- 14.J. Kristensen & J.H. Rindel: "Bygningsakustik. Teori og praksis". SBI-anvisning 166, Statens Byggeforskningsinstitut, SBI, Hørsholm 1989. (Translation to English available from JHR).
- 15.ДБН В.1.2-10-2008 Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Основні вимоги до будівель і споруд. Захист від шуму
- 16.DIN 4109 Schallschutz im Hochbau. Anforderungen und Nachweise, Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, 1989.
- 17.Beiblatt 1 zu DIN 4109 Schallschutz im Hochbau. Ausführungsbeispiele und Rechenverfahren, 1989.
- 18.PN-B-02151-3:1999 Akustyka budowlana. Ochrona przed hałasem w budynkach - Izolacyjność akustyczna przegród w budynkach oraz izolacyjność akustyczna elementów budowlanych. Wymagania. Polski Komitet Normalizacyjny
- 19.EN 12354 – 1:2000 Building acoustics – Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements – Part 1: Airborne sound insulation between rooms.
20. ДСТУ-Н Б В.1.1-34 (2013). Настанова з розрахунку та проектування звукоізоляції огорожувальних конструкцій житлових і громадських будинків

21. Котенко С. Г. Про акустичний комфорт малих придорожніх готелів / С. Г. Котенко // Системи обробки інформації. - 2014. - Вип. 7. - С. 32-40. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/soi_2014_7_9
22. ВП Заєць. Застосування метода кінцевих елементів до прогнозування акустичних характеристик звукових полів в повітрі. 2022. Sciences of Europe (95), стр. 30-37
23. V Zaets, S Kotenko. Influence of two round impedance noise protection screens of their efficiency. 2022/3/23, Journal Akustika (42)
24. Zaets, V., & Bida, D. (2021). Influence of sound-absorbing properties of noise protection barriers on road traffic participants. Technology Audit & Production Reserves, 6(1).
25. <https://www.unstudio.com/en/page/11729/lyric-theatre-complex>
26. Gomperts, M. C. Kihlman, T. The Sound Transmission Loss of Circular and Slit-Shaped Apertures in Walls. Acta Acustica united with Acustica, Volume 18, Number 3, 1967, pp. 144-150.

ДОДАТОК А

Список опублікованих праць за темою дисертації

Статті в наукових виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України з присвоєнням категорії “Б”:

1. Заєць В.П., Котенко С.Г., Біда Д.В. Аналітичний розв’язок задачі знаходження ефективності частково імпедансних шумозахисних екранів. // Sciences of Europe. 2021. Vol. 1. P. 38-47. <https://doi.org/10.24412/3162-2364-2021-81-1-38-47>
2. Біда Д.В., Пушечнікова Т., Заєць В.П. Методи розрахунку звукоізоляції багатошарових конструкцій // Мікросистеми, Електроніка та Акустика. 2020. V. 25 (2). P. 50-56. <https://doi.org/10.20535/2523-4455.me.197298>
3. Bida D.V., Zaretskyi V.Y. Research of sound insulation frequency response for a multilayer inhomogeneous wall structures. // Technology audit and production reserves. 2022. Vol. 4. № 2 (66). P. 37-4. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.262262>
4. Bida D.V., Didkovskyi V.S. Descriptors of sound insulation of building structures in residential buildings in Ukraine and Europe // Technology audit and production reserves. 2022. Vol. 5. № 2 (67) P. 25-29. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.265816>
5. Zaets V. P., Bida D.V. Influence of sound-absorbing properties of noise protection barriers on road traffic participants // Technology audit and production reserves. 2021. Vol. 6. № 1 (62). P. 14-18. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2021.244597>

Доповіді на конференціях:

3. Звукоізоляційні властивості багатошарових стінових конструкцій на основі гкл. Біда Д.В., Зарецький В.Ю., Заєць В.П. «Теорія і практика сучасної науки» III міжнародна наукова-практична конференція м. Київ, 2018
4. Актуальні проблеми проектування та будівництва звукоізоляційних покрівель. Біда Д.В., Зарецький В.Ю., Котенко С.Г. «Теорія і практика сучасної науки» III міжнародна наукова-практична конференція м. Київ, 2018

Результати експериментів з натурних об'єктів з різними конструкційними елементами (перегородками)

Частотні характеристики багатошарових конструкцій з використанням цегли та ГКЛ. Показують рівень зниження шуму в залежності від частоти dB(Hz); Hz – горизонтальна вісь; dB – вертикальна вісь

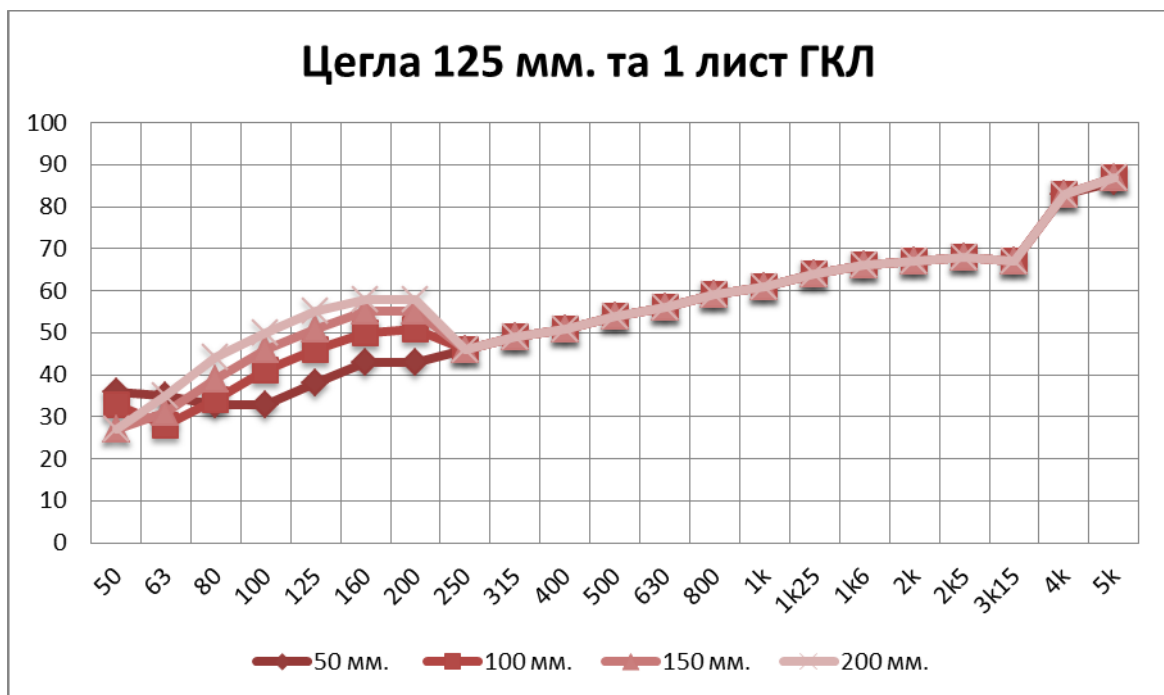


Рис. Б. 1. Частотна характеристика багатошарової стінової конструкції на основі цегли 125 мм. та 1 листа ГКЛ, при зміні товщини прошарку ефективного звукопоглинального матеріалу.

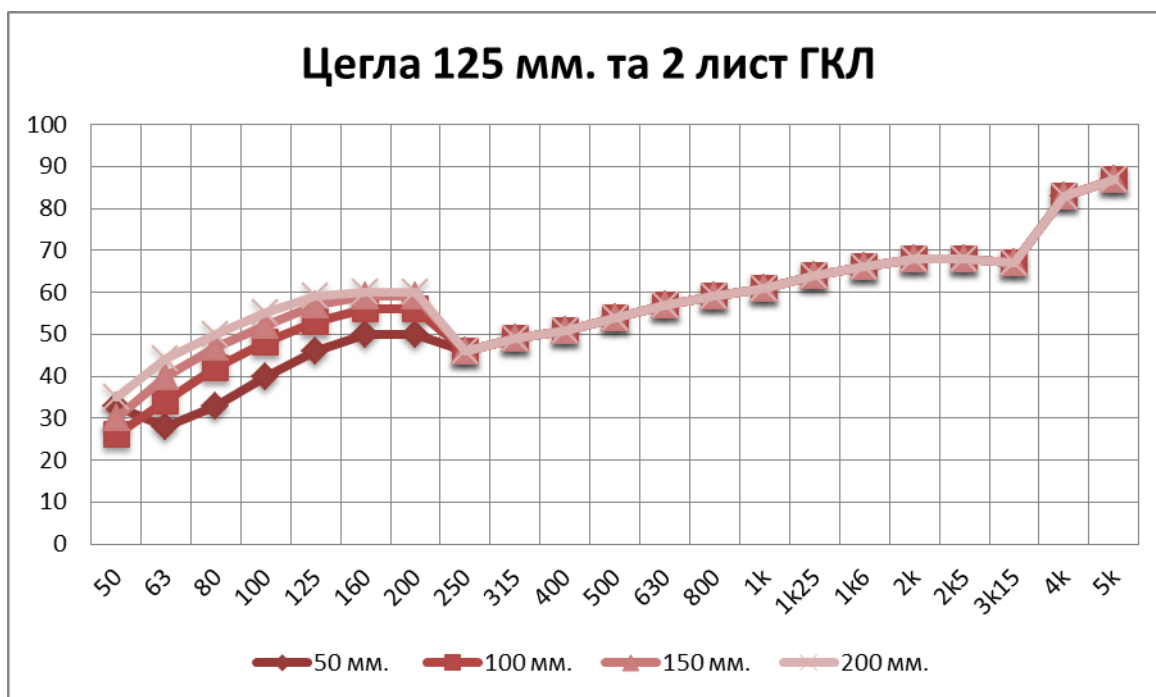


Рис. Б. 2. Частотна характеристика багатошарової стінової конструкції на основі цегли 125 мм. та 2 листів ГКЛ, при зміні товщини прошарку ефективного звукопоглинального матеріалу.

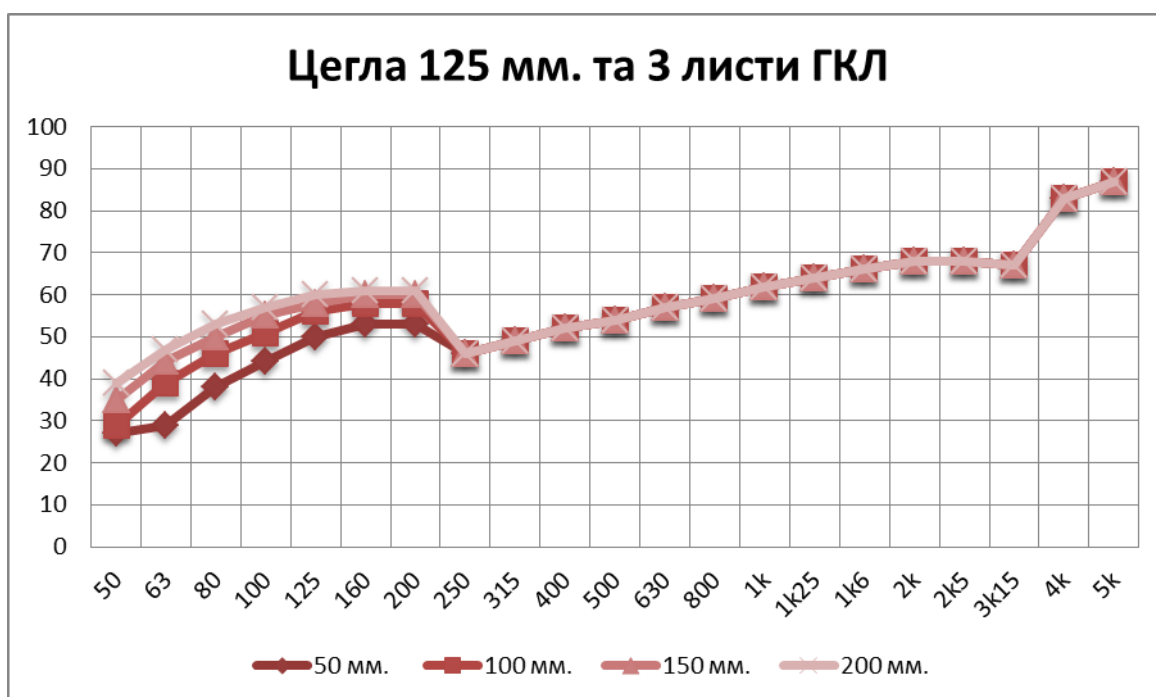


Рис. 40 Частотна характеристика багатошарової стінової конструкції на основі цегли 125 мм. та 3 листів ГКЛ, при зміні товщини прошарку ефективного звукопоглинального матеріалу.

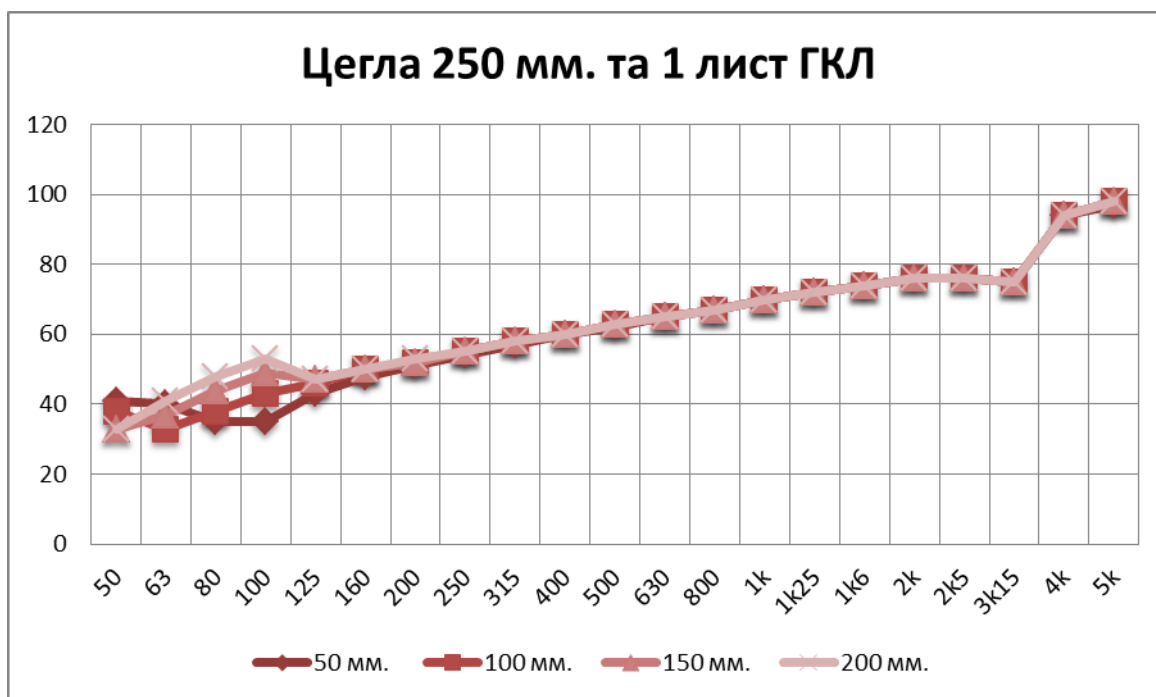


Рис. Б. 3. Частотна характеристика багатошарової стінової конструкції на основі цегли 250 мм. та 1 листа ГКЛ, при зміні товщини прошарку ефективного звукопоглинального матеріалу.

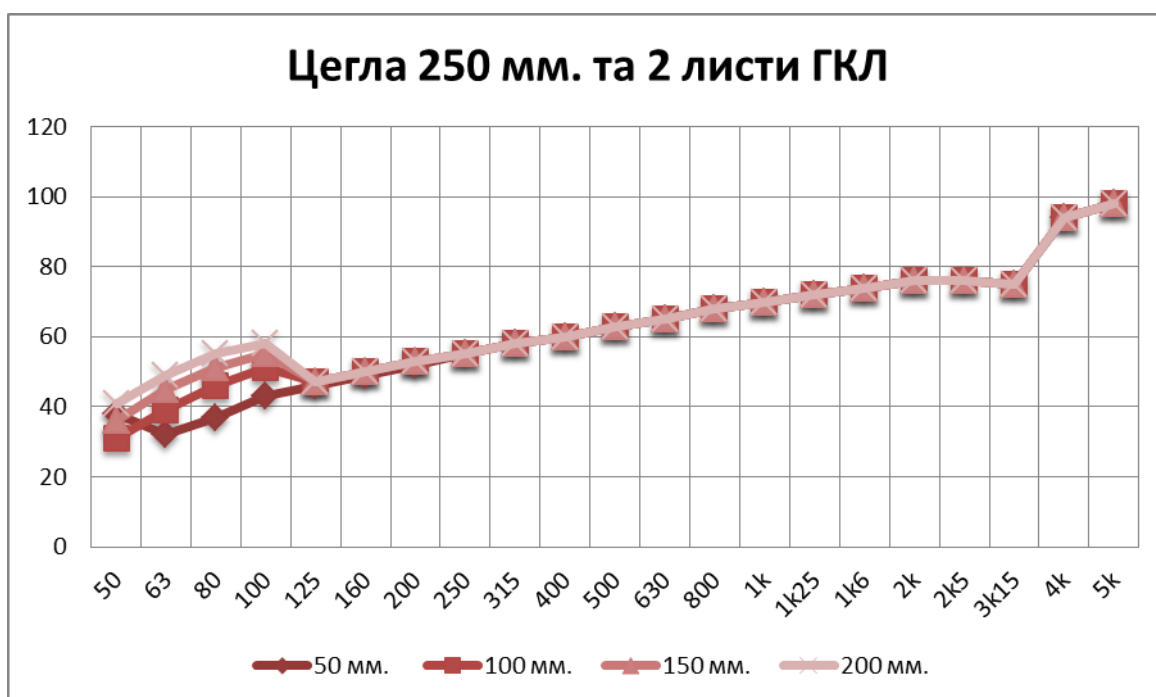


Рис. Б. 4. Частотна характеристика багатошарової стінової конструкції на основі цегли 250 мм. та 2 листів ГКЛ, при зміні товщини прошарку ефективного звукопоглинального матеріалу.

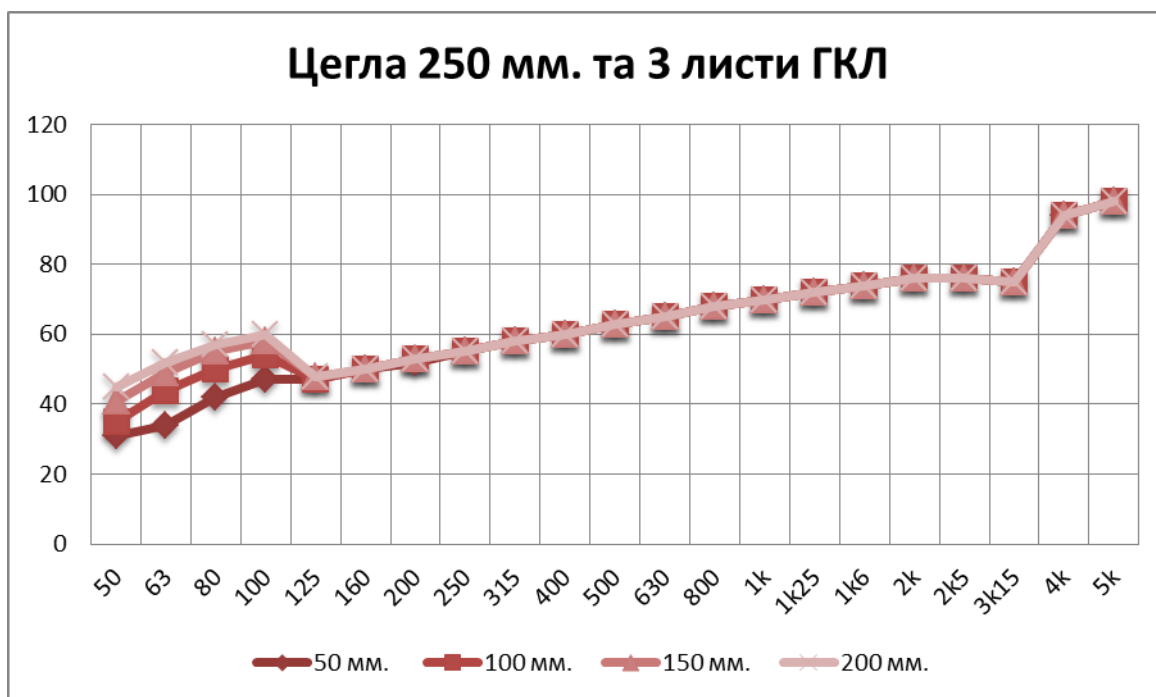


Рис. Б. 5. Частотна характеристика багатошарової стінової конструкції на основі цегли 250 мм. та 3 листів ГКЛ, при зміні товщини прошарку ефективного звукопоглинального матеріалу.

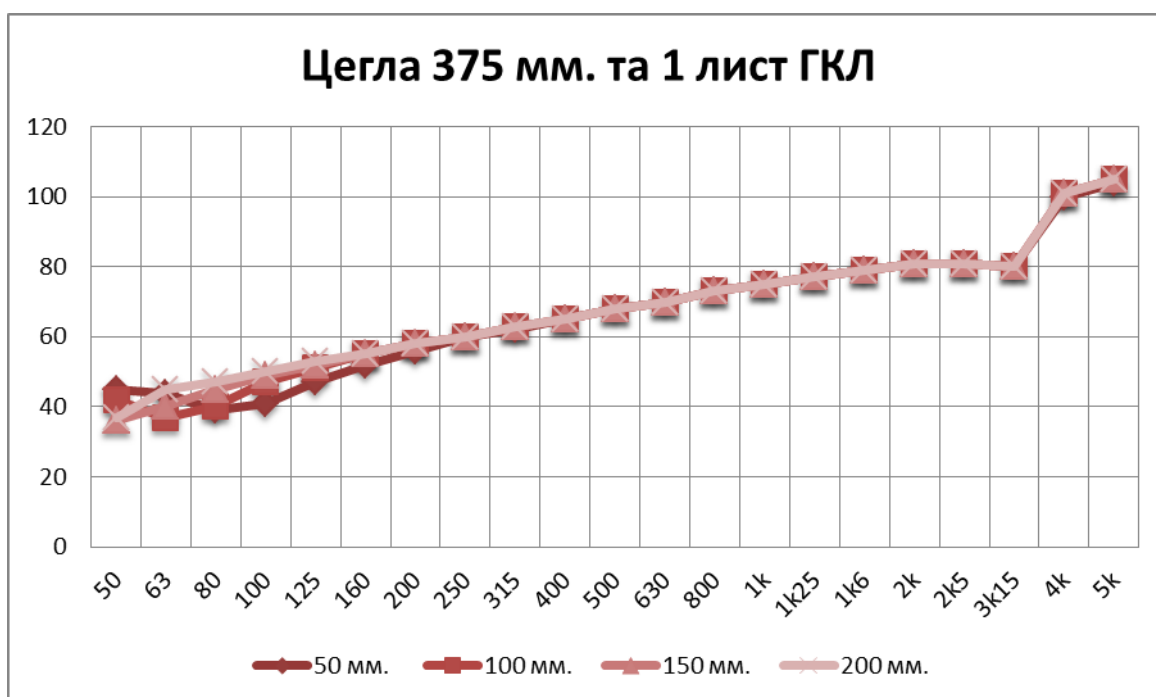


Рис. Б. 6. Частотна характеристика багатошарової стінової конструкції на основі цегли 375 мм. та 1 листа ГКЛ, при зміні товщини прошарку ефективного звукопоглинального матеріалу.

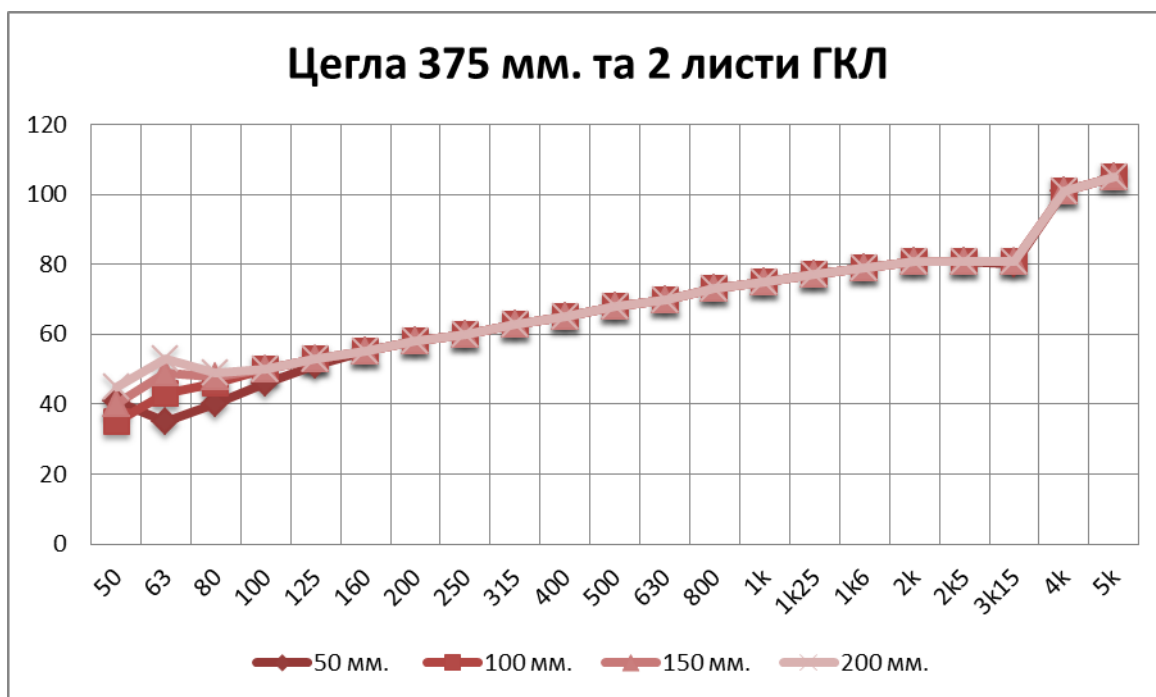


Рис. Б. 7. Частотна характеристика багатошарової стінової конструкції на основі цегли 375 мм. та 2 листів ГКЛ, при зміні товщини прошарку ефективного звукопоглинального матеріалу.

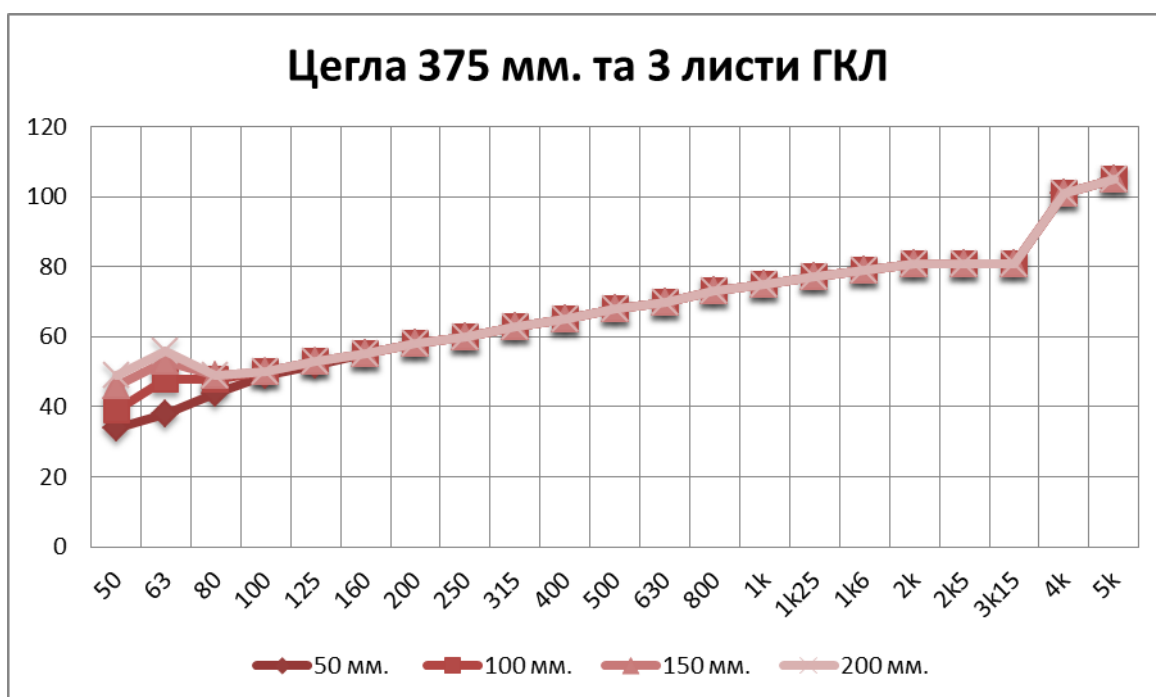


Рис. Б. 8. Частотна характеристика багатошарової стінової конструкції на основі цегли 375 мм. та 3 листів ГКЛ, при зміні товщини прошарку ефективного звукопоглинального матеріалу.

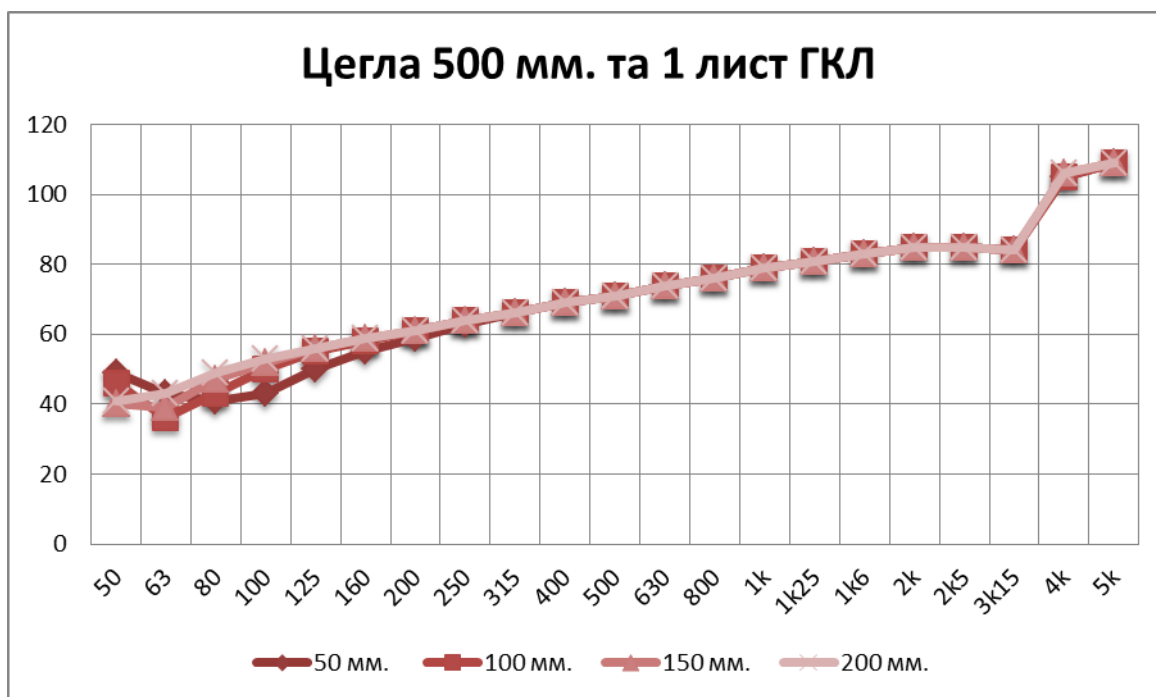


Рис. Б. 9. Частотна характеристика багатошарової стінової конструкції на основі цегли 500 мм. та 1 листа ГКЛ, при зміні товщини прошарку ефективного звукопоглинального матеріалу.

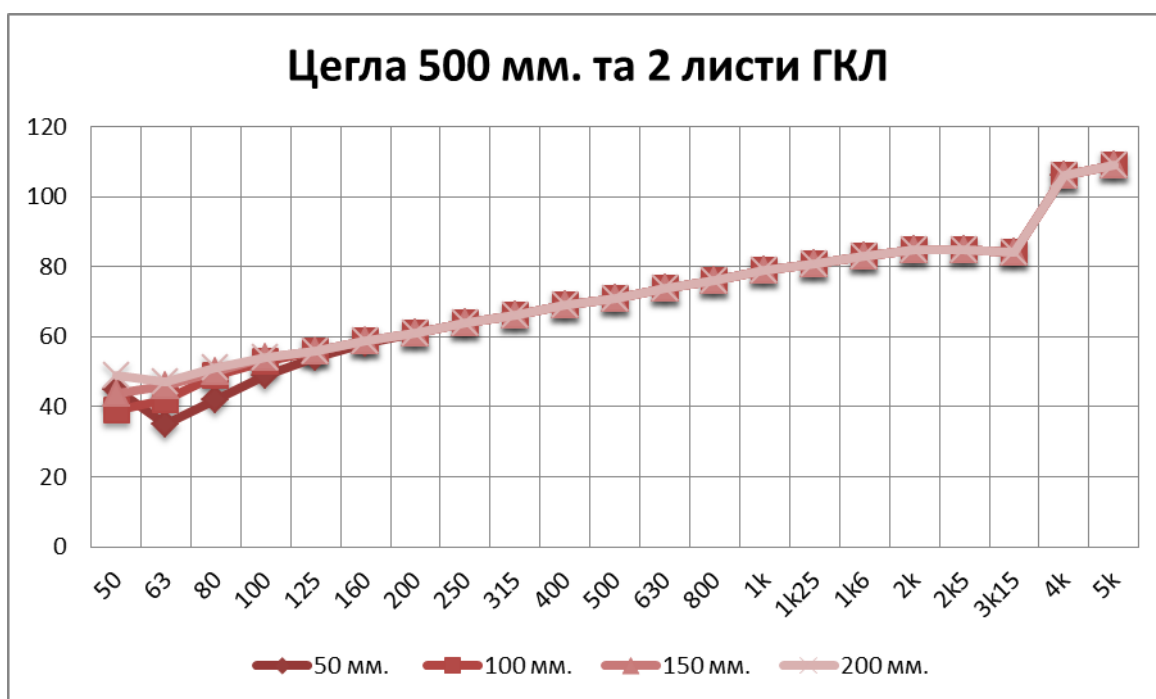


Рис. Б. 10. Частотна характеристика багатошарової стінової конструкції на основі цегли 500 мм. та 2 листів ГКЛ, при зміні товщини прошарку ефективного звукопоглинального матеріалу.

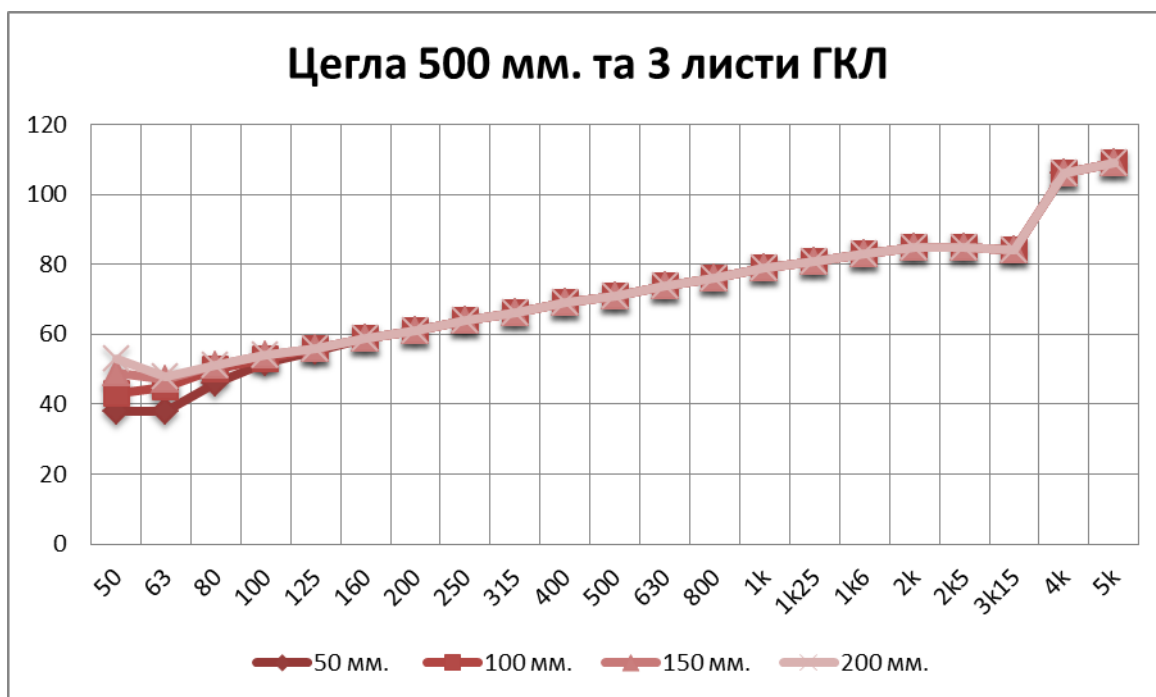


Рис. Б. 11. Частотна характеристика багатошарової стінової конструкції на основі цегли 500 мм. та 3 листів ГКЛ, при зміні товщини прошарку ефективного звукопоглинального матеріалу.

Частотні характеристики багатошарових конструкцій з використанням газобетонного блоку 400 кг/м³ та ГКЛ. Показують рівень зниження шуму в залежності від частоти dB(Hz).

Hz – горизонтальна вісь;

dB – вертикальна вісь.

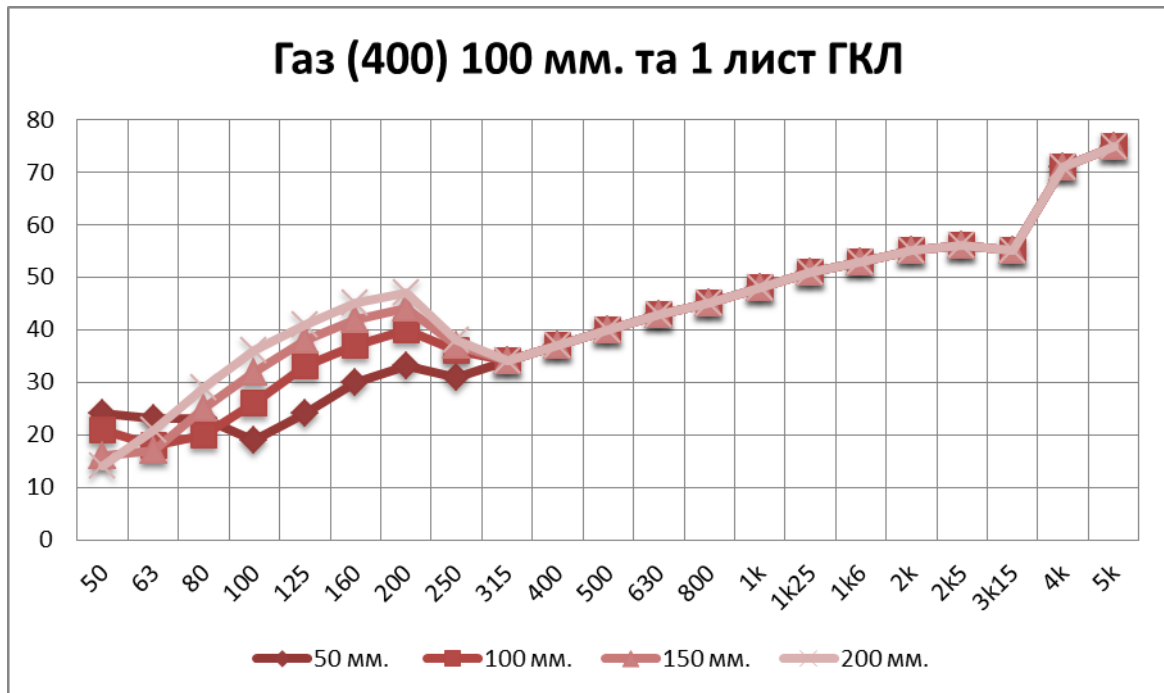


Рис. Б. 12. Частотна характеристика багатошарової стінової конструкції на основі газобетонного блоку 100 мм. та 1 листа ГКЛ, при зміні товщини прошарку ефективного звукопоглинального матеріалу.

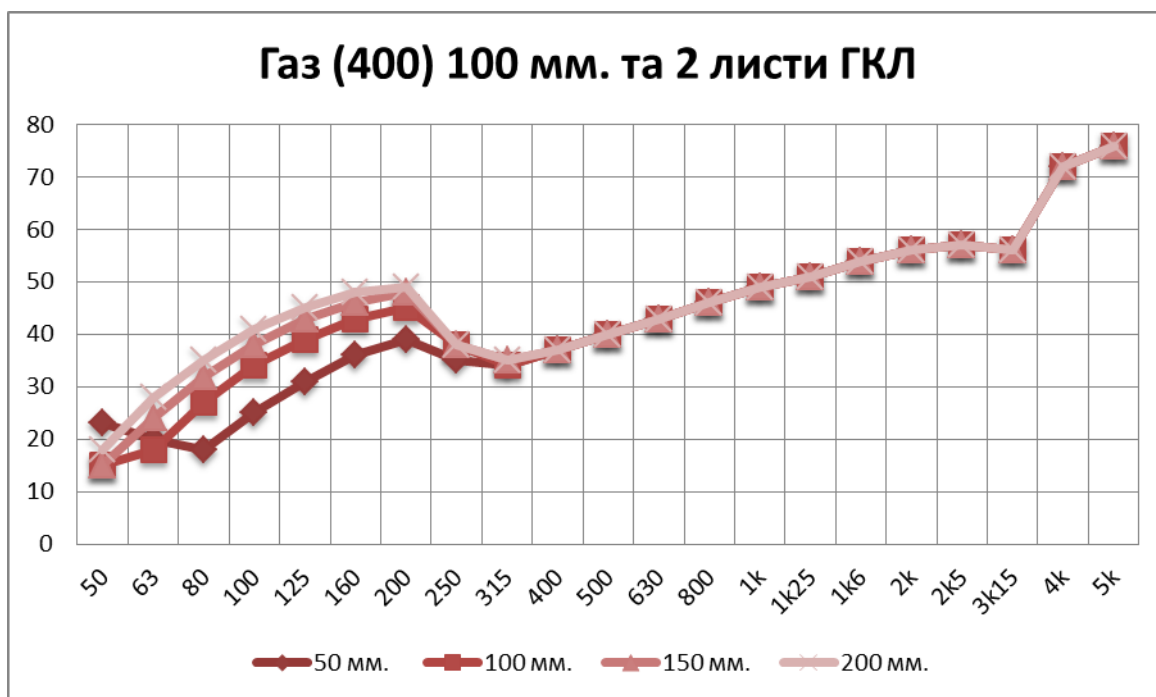


Рис. Б. 13. Частотна характеристика багатошарової стінової конструкції на основі газобетонного блоку 100 мм. та 2 листів ГКЛ, при зміні товщини прошарку ефективного звукопоглинального матеріалу.

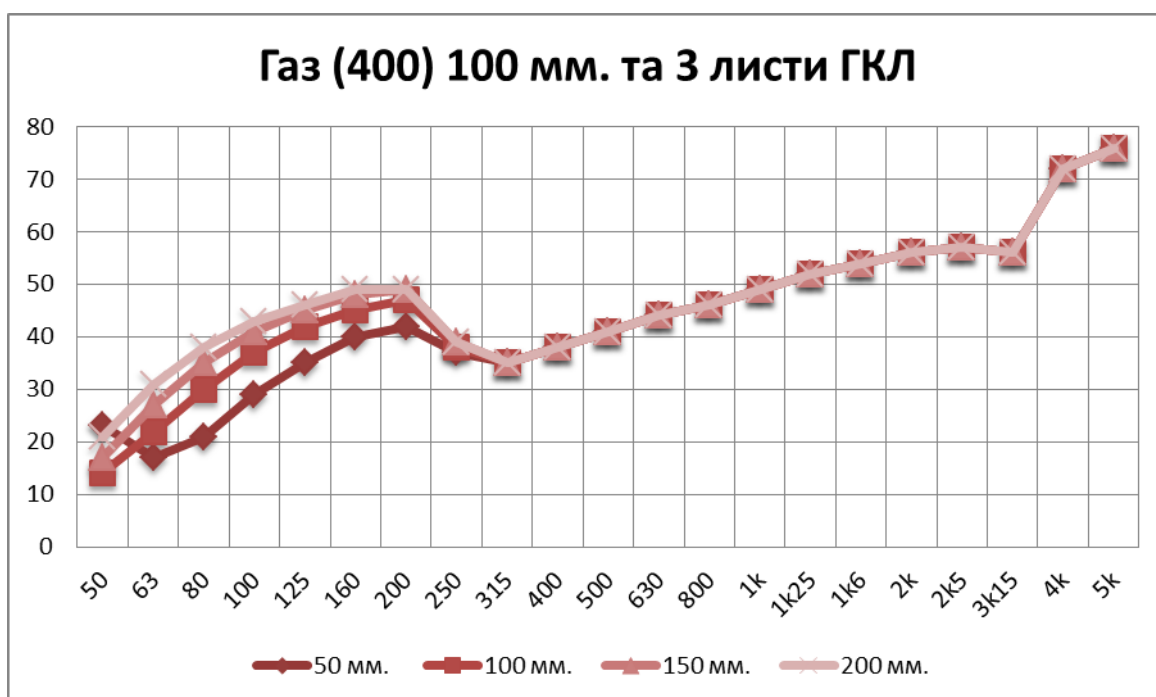


Рис. Б. 14. Частотна характеристика багатошарової стінової конструкції на основі газобетонного блоку 100 мм. та 3 листів ГКЛ, при зміні товщини прошарку ефективного звукопоглинального матеріалу.

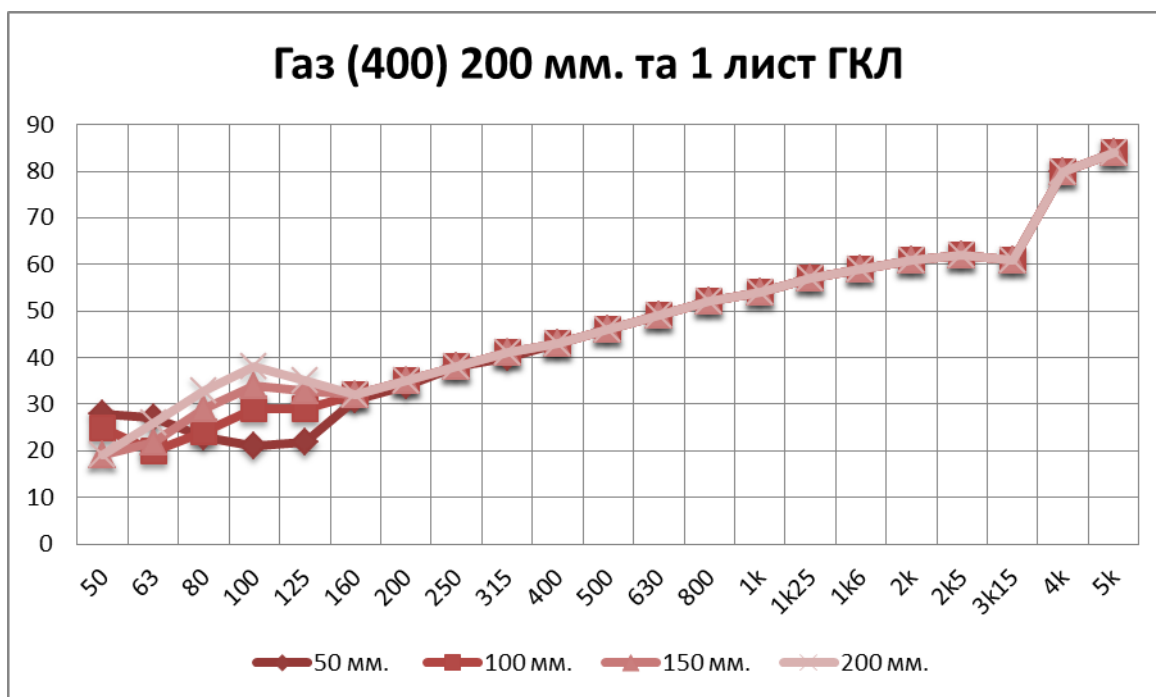


Рис. Б. 15. Частотна характеристика багатошарової стінової конструкції на основі газобетонного блоку 200 мм. та 1 листа ГКЛ, при зміні товщини прошарку ефективного звукопоглинального матеріалу.

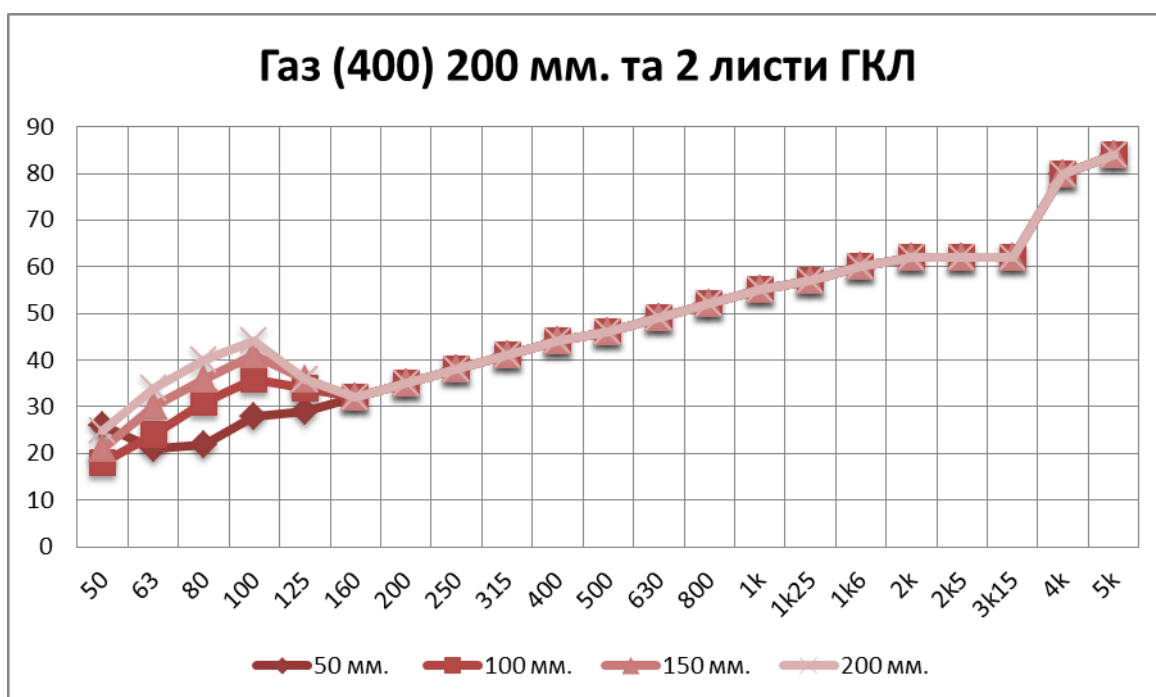


Рис. Б. 16. Частотна характеристика багатошарової стінової конструкції на основі газобетонного блоку 100 мм. та 2 листів ГКЛ, при зміні товщини прошарку ефективного звукопоглинального матеріалу.

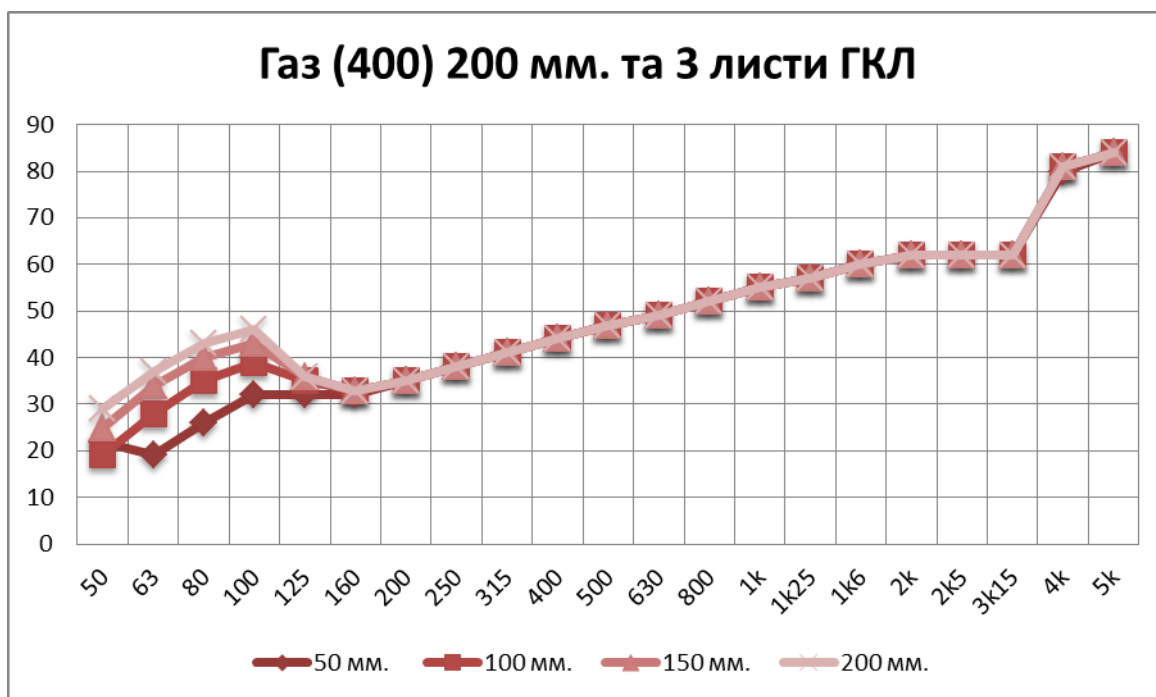


Рис. Б. 17. Частотна характеристика багатошарової стінової конструкції на основі газобетонного блоку 100 мм. та 3 листів ГКЛ, при зміні товщини прошарку ефективного звукопоглинального матеріалу.

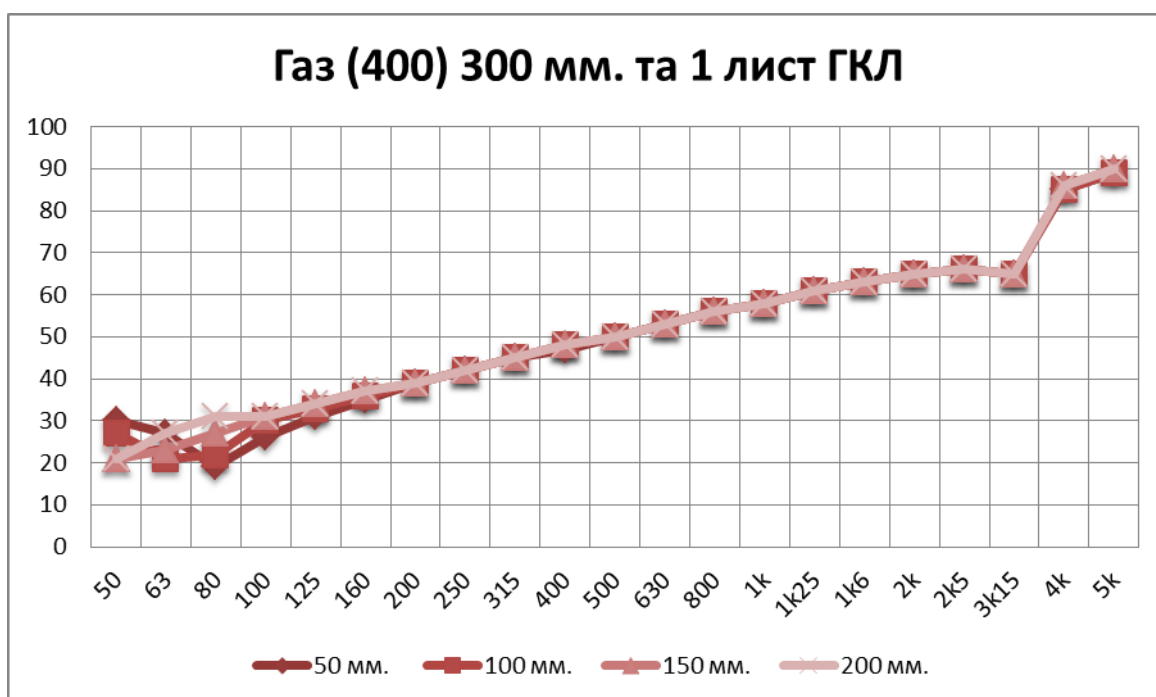


Рис. Б. 18. Частотна характеристика багатошарової стінової конструкції на основі газобетонного блоку 300 мм. та 1 листа ГКЛ, при зміні товщини прошарку ефективного звукопоглинального матеріалу.

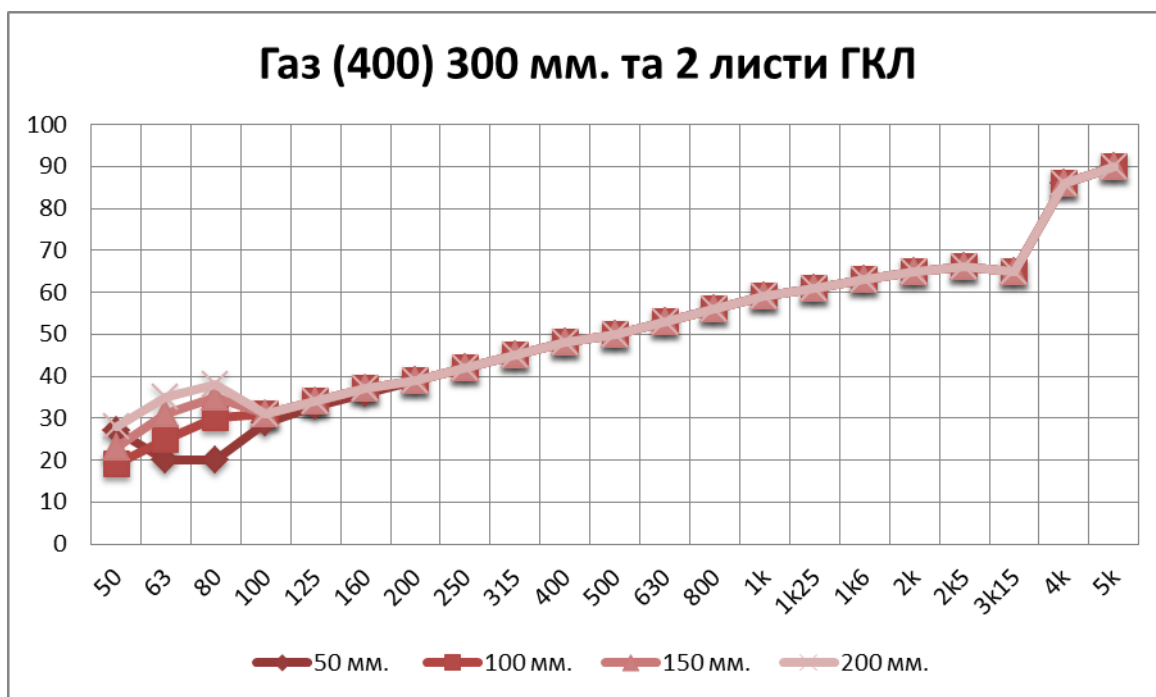


Рис. Б. 19. Частотна характеристика багатошарової стінової конструкції на основі газобетонного блоку 300 мм. та 2 листів ГКЛ, при зміні товщини прошарку ефективного звукопоглинального матеріалу.

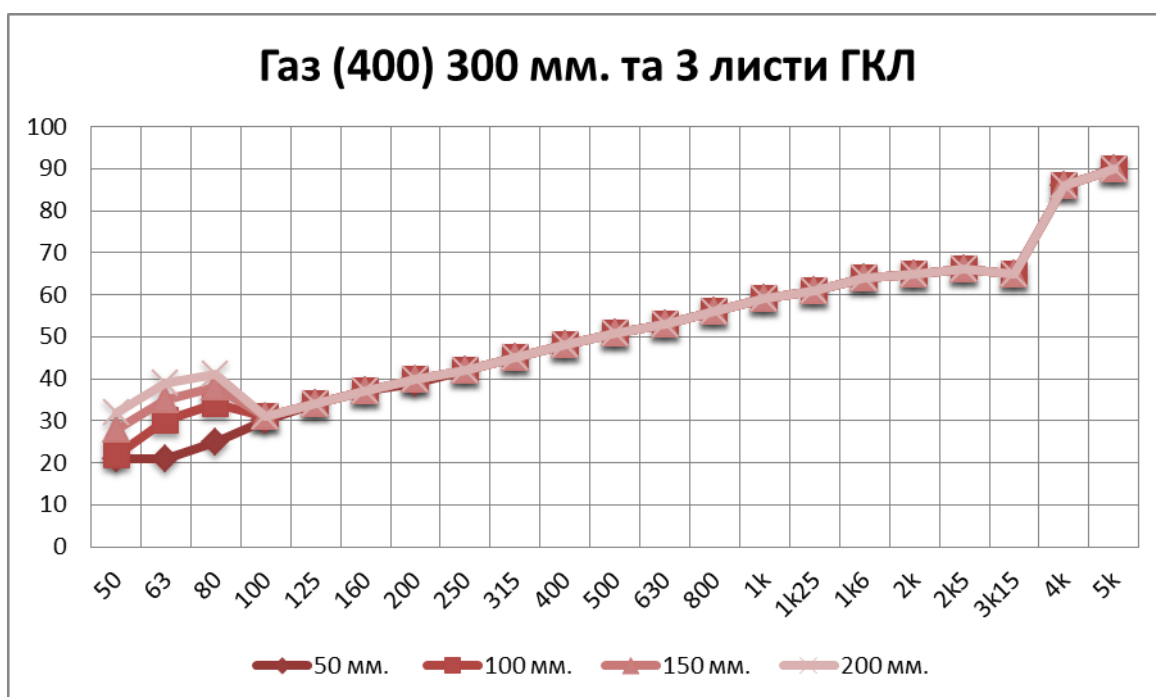


Рис. Б. 20. Частотна характеристика багатошарової стінової конструкції на основі газобетонного блоку 300 мм. та 3 листів ГКЛ, при зміні товщини прошарку ефективного звукопоглинального матеріалу.

Частотні характеристики багатошарових конструкцій з використанням газобетонного блоку 600 кг/м³ та ГКЛ. Показують рівень зниження шуму в залежності від частоти dB(Hz).

Hz – горизонтальна вісь;

dB – вертикальна вісь.

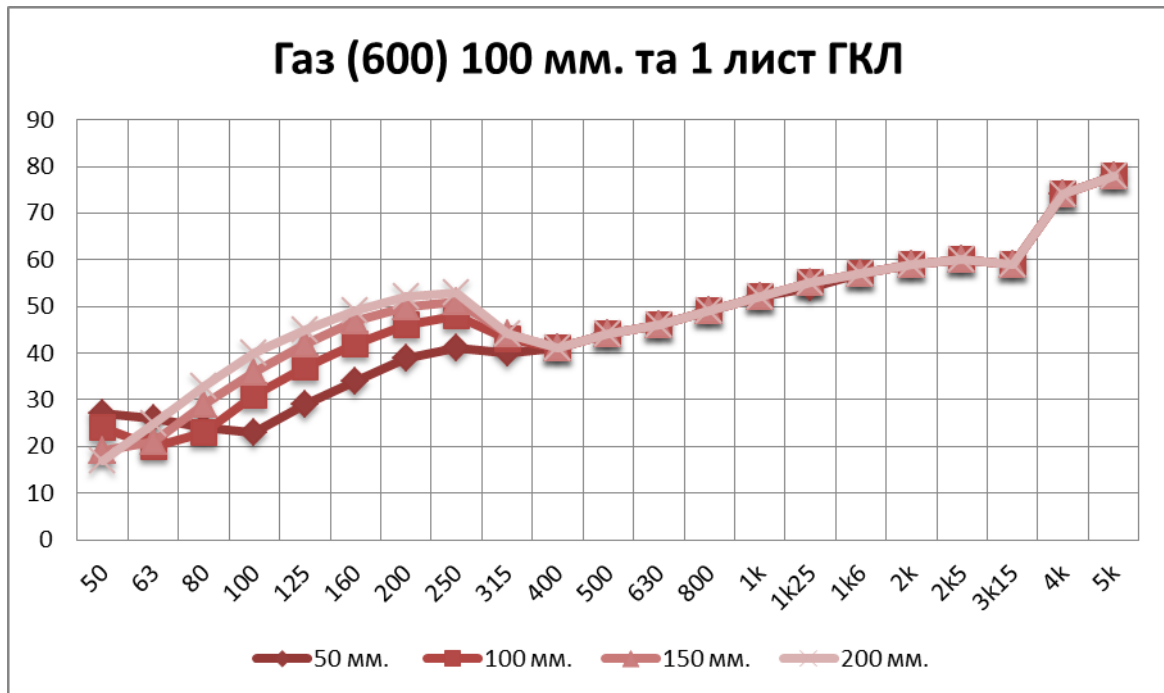


Рис. Б. 21. Частотна характеристика багатошарової стінової конструкції на основі газобетонного блоку 100 мм. та 1 листа ГКЛ, при зміні товщини прошарку ефективного звукопоглинального матеріалу.

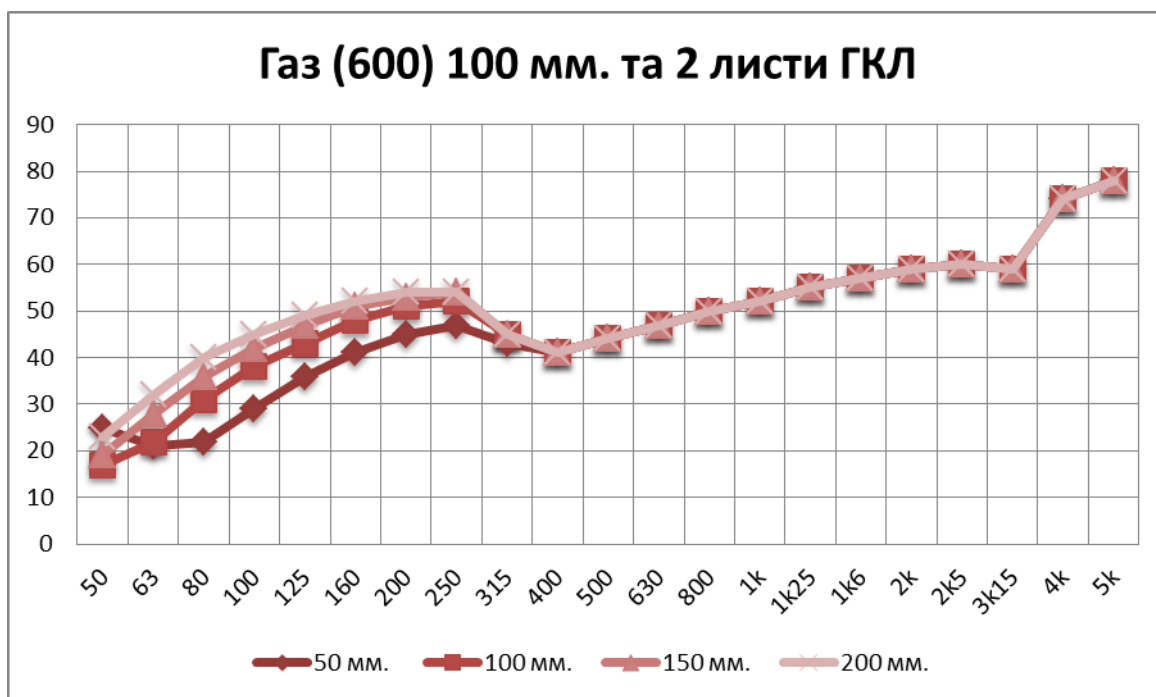


Рис. Б. 22. Частотна характеристика багат шарової стінової конструкції на основі газобетонного блоку 100 мм. та 2 листів ГКЛ, при зміні товщини про шарку ефективного звукопоглинального матеріалу.

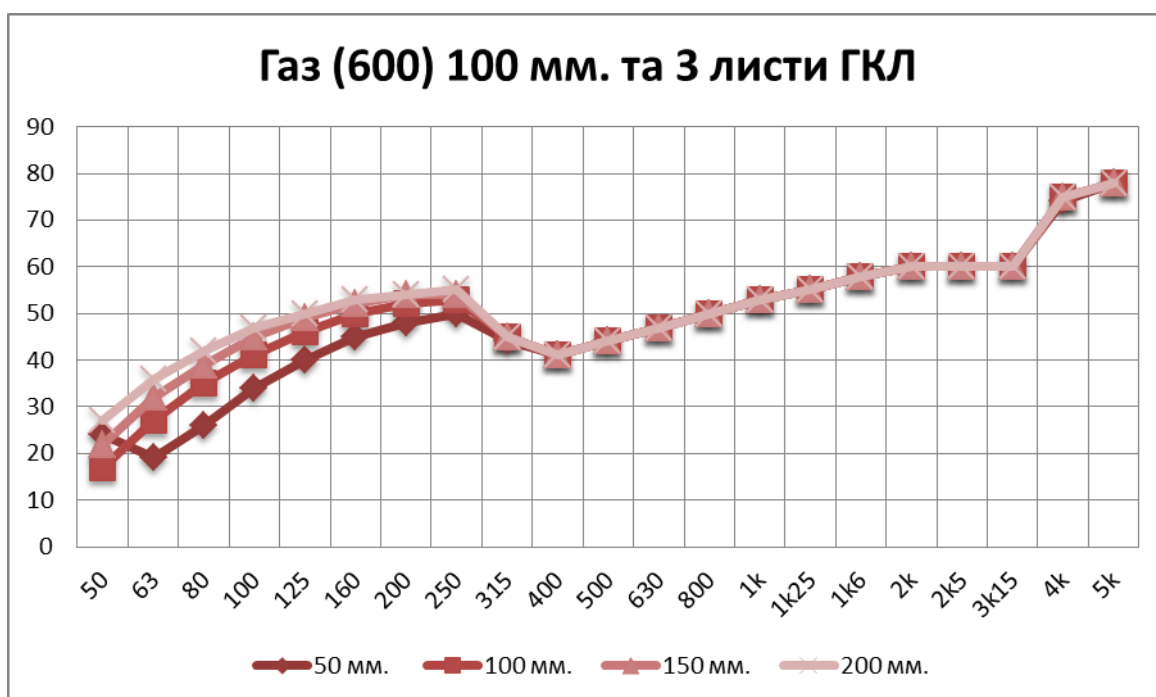


Рис. Б. 23. Частотна характеристика багат шарової стінової конструкції на основі газобетонного блоку 100 мм. та 3 листів ГКЛ, при зміні товщини про шарку ефективного звукопоглинального матеріалу.

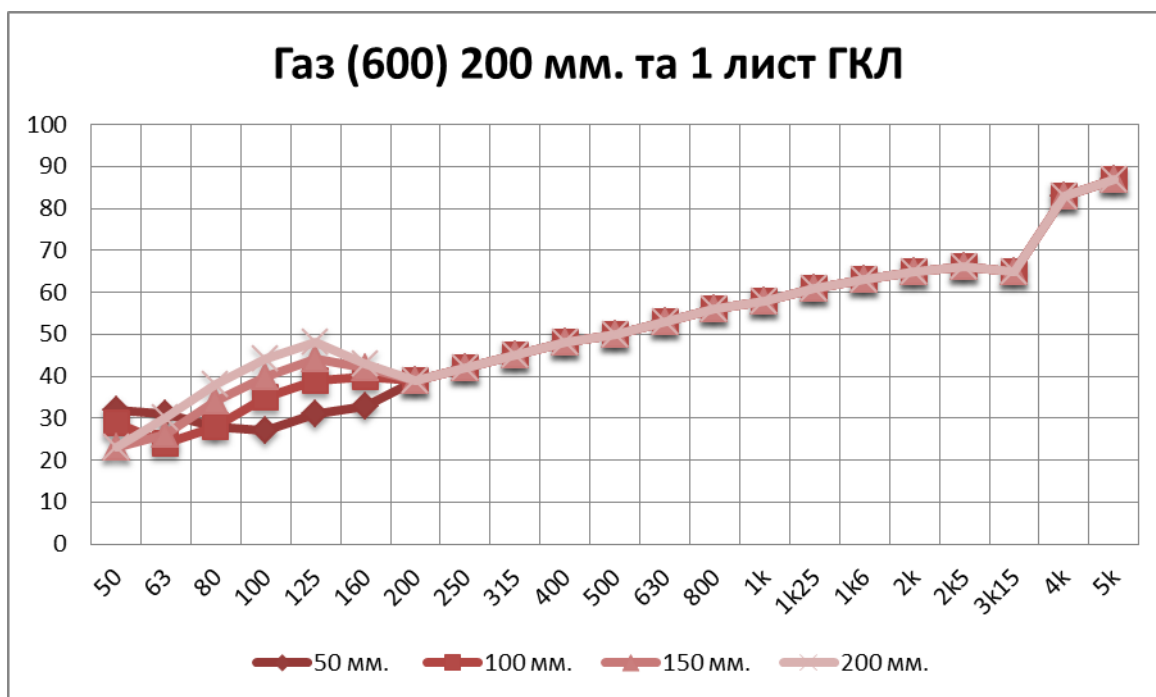


Рис. Б. 24. Частотна характеристика багатошарової стінової конструкції на основі газобетонного блоку 200 мм. та 1 листа ГКЛ, при зміні товщини прошарку ефективного звукопоглинального матеріалу.

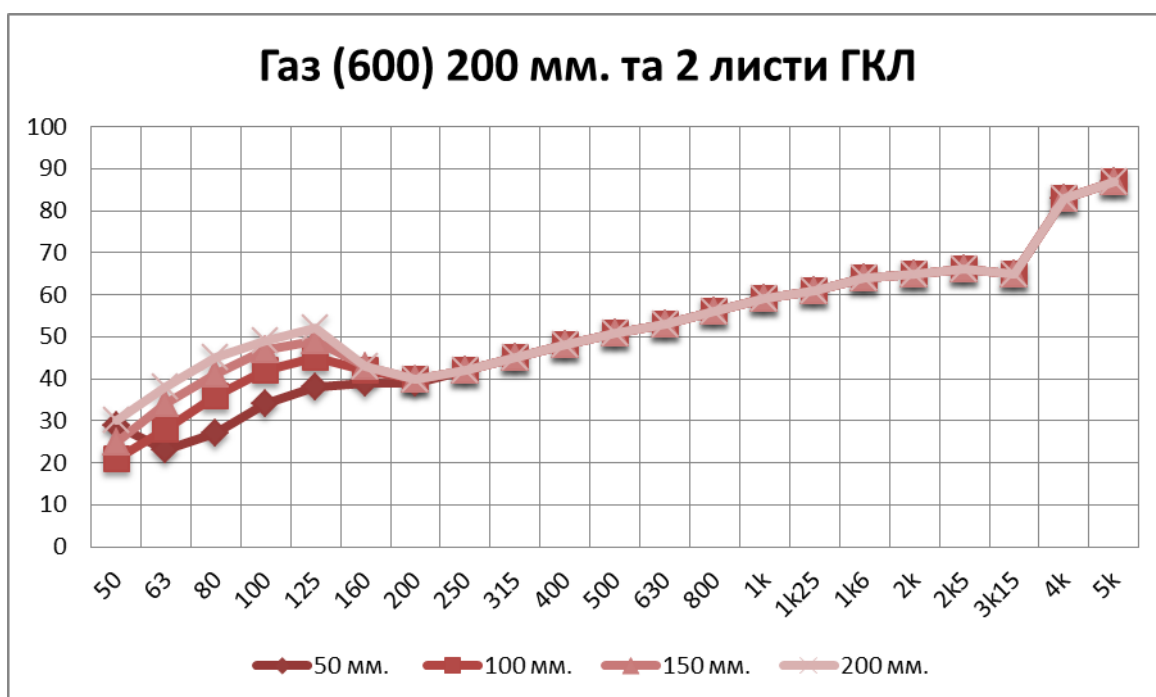


Рис. Б. 25. Частотна характеристика багатошарової стінової конструкції на основі газобетонного блоку 200 мм. та 2 листів ГКЛ, при зміні товщини прошарку ефективного звукопоглинального матеріалу.

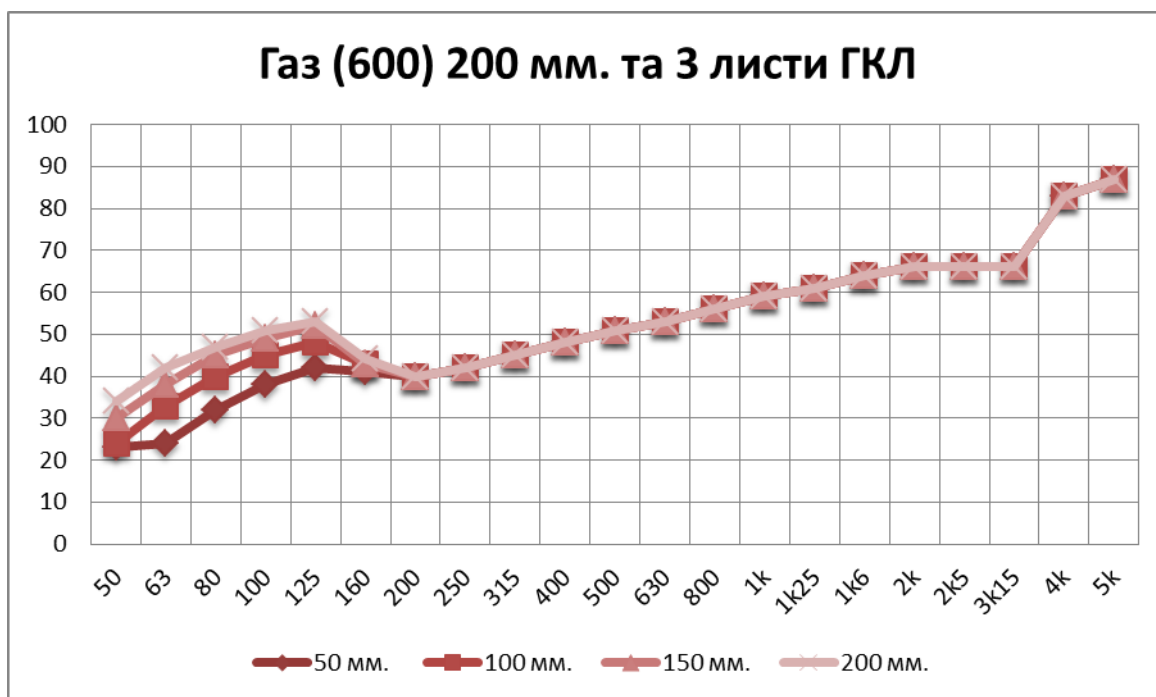


Рис. Б. 26. Частотна характеристика багатошарової стінової конструкції на основі газобетонного блоку 200 мм. та 3 листів ГКЛ, при зміні товщини прошарку ефективного звукопоглинального матеріалу.

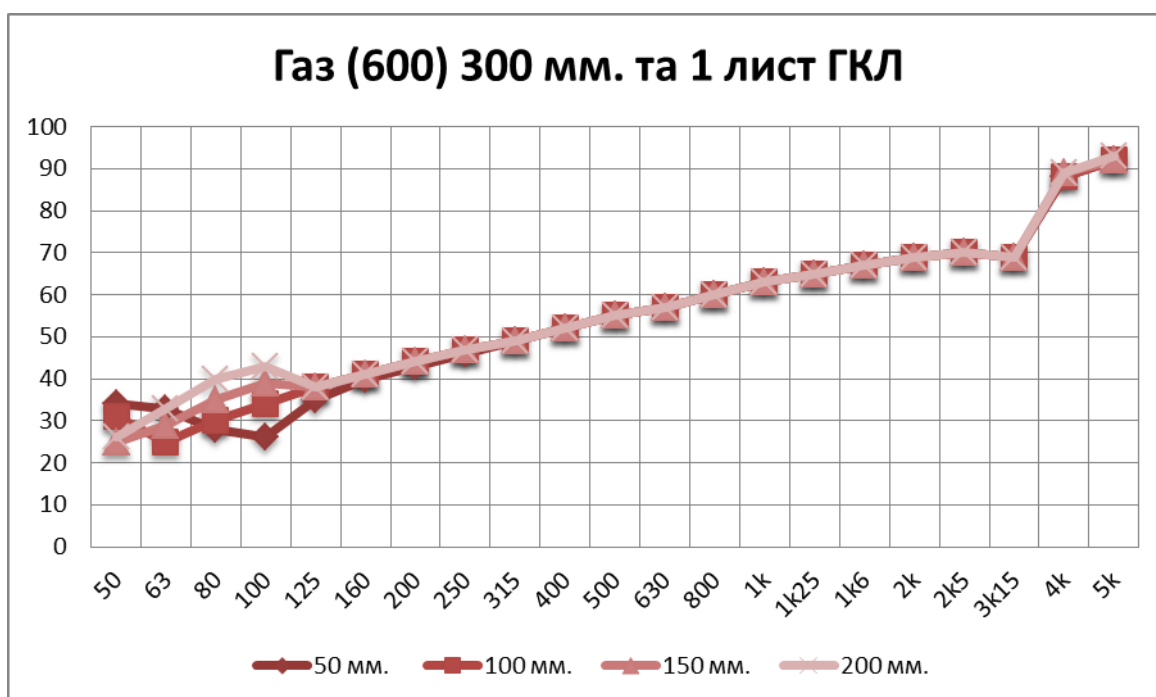


Рис. Б. 27. Частотна характеристика багатошарової стінової конструкції на основі газобетонного блоку 300 мм. та 1 листа ГКЛ, при зміні товщини прошарку ефективного звукопоглинального матеріалу.

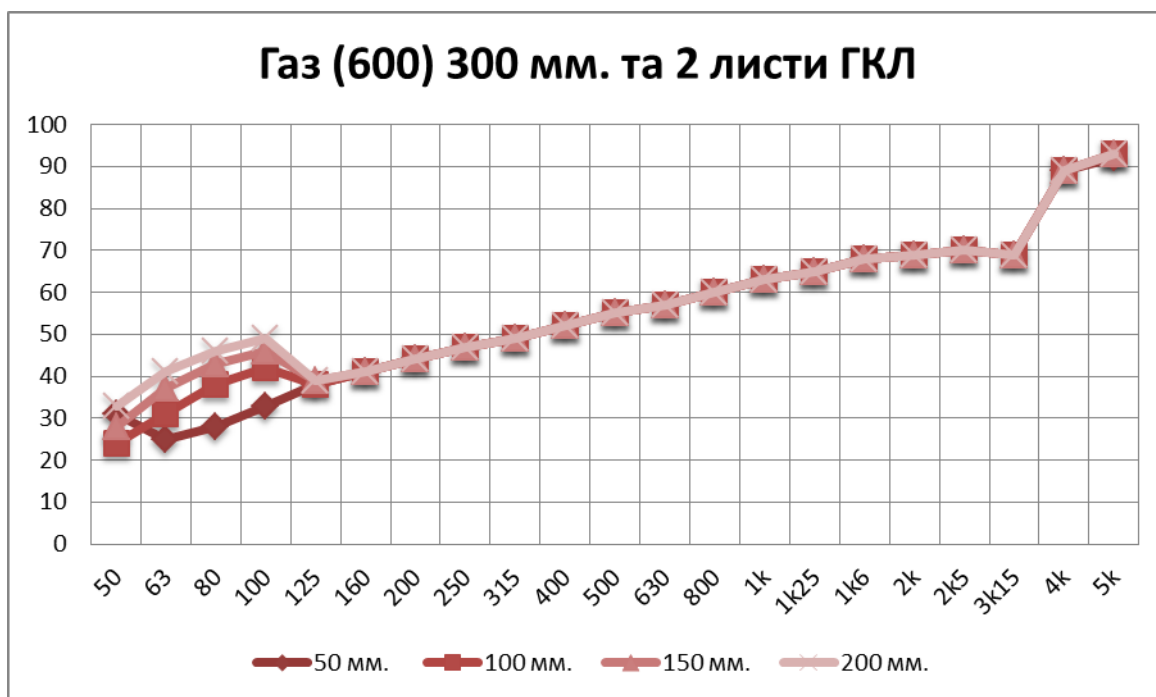


Рис. Б. 28. Частотна характеристика багатошарової стінової конструкції на основі газобетонного блоку 300 мм. та 2 листів ГКЛ, при зміні товщини прошарку ефективного звукопоглинального матеріалу.

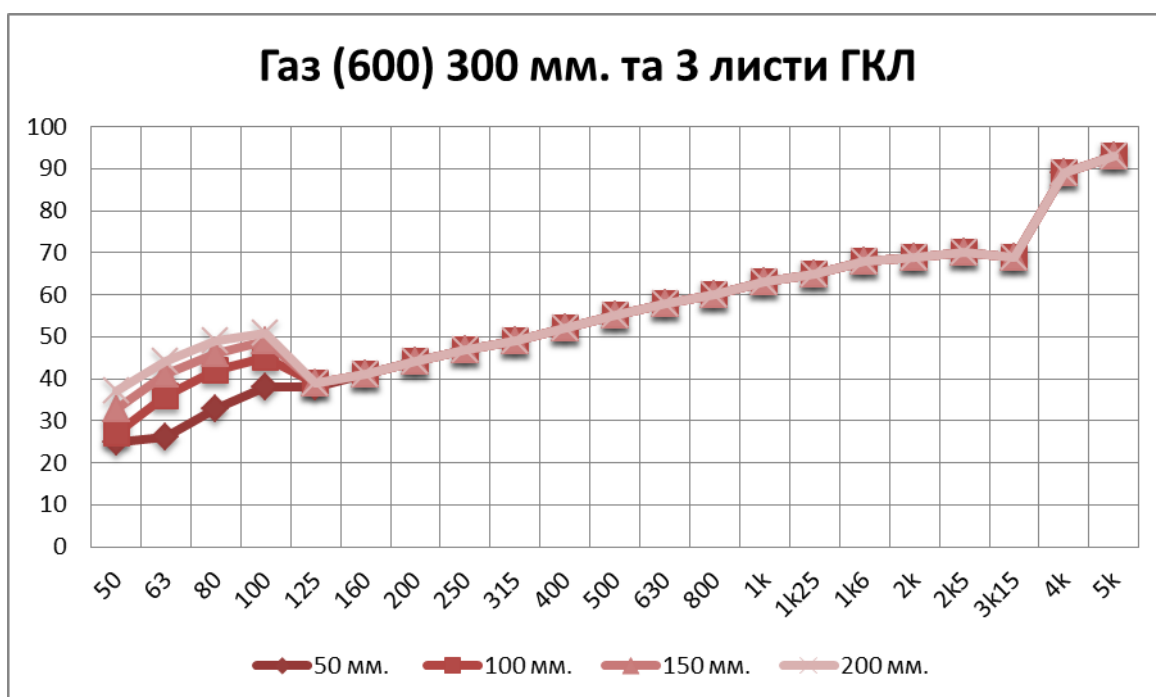


Рис. Б. 29. Частотна характеристика багатошарової стінової конструкції на основі газобетонного блоку 300 мм. та 3 листів ГКЛ, при зміні товщини прошарку ефективного звукопоглинального матеріалу.

Частотні характеристики багатошарових конструкцій з використанням газобетонного блоку 800 кг/м^3 та ГКЛ. Показують рівень зниження шуму в залежності від частоти dB(Hz).

Hz – горизонтальна вісь;

dB – вертикальна вісь.

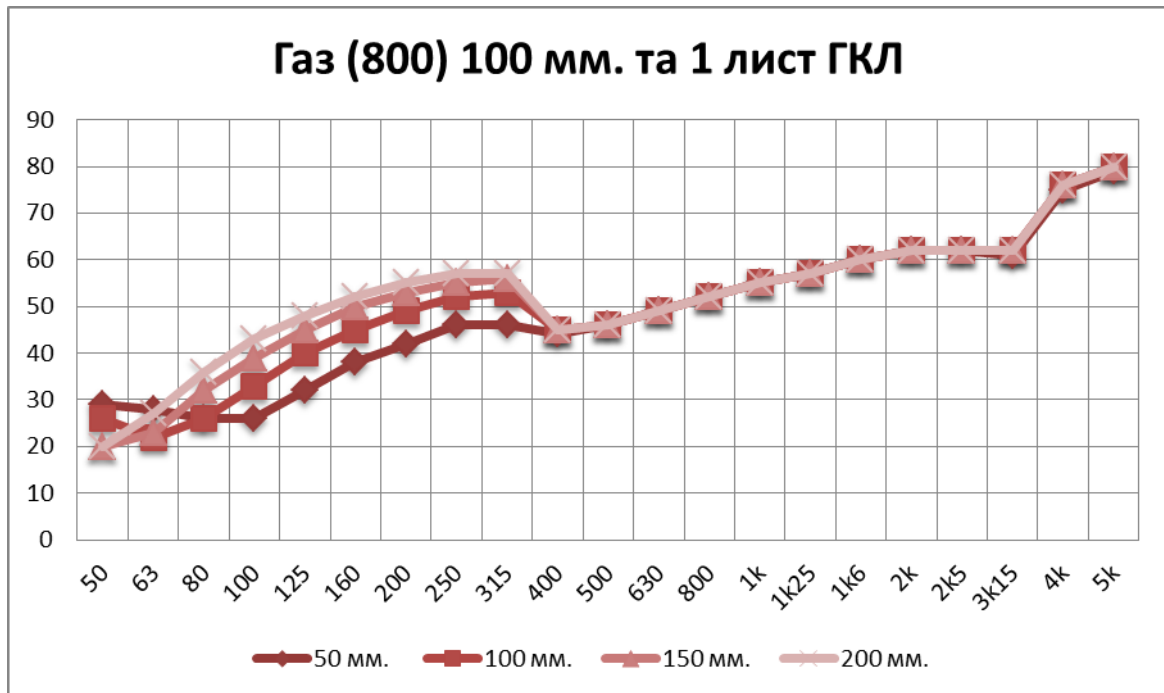


Рис. Б. 30. Частотна характеристика багатошарової стінової конструкції на основі газобетонного блоку 100 мм. та 1 листа ГКЛ, при зміні товщини прошарку ефективного звукопоглинального матеріалу.

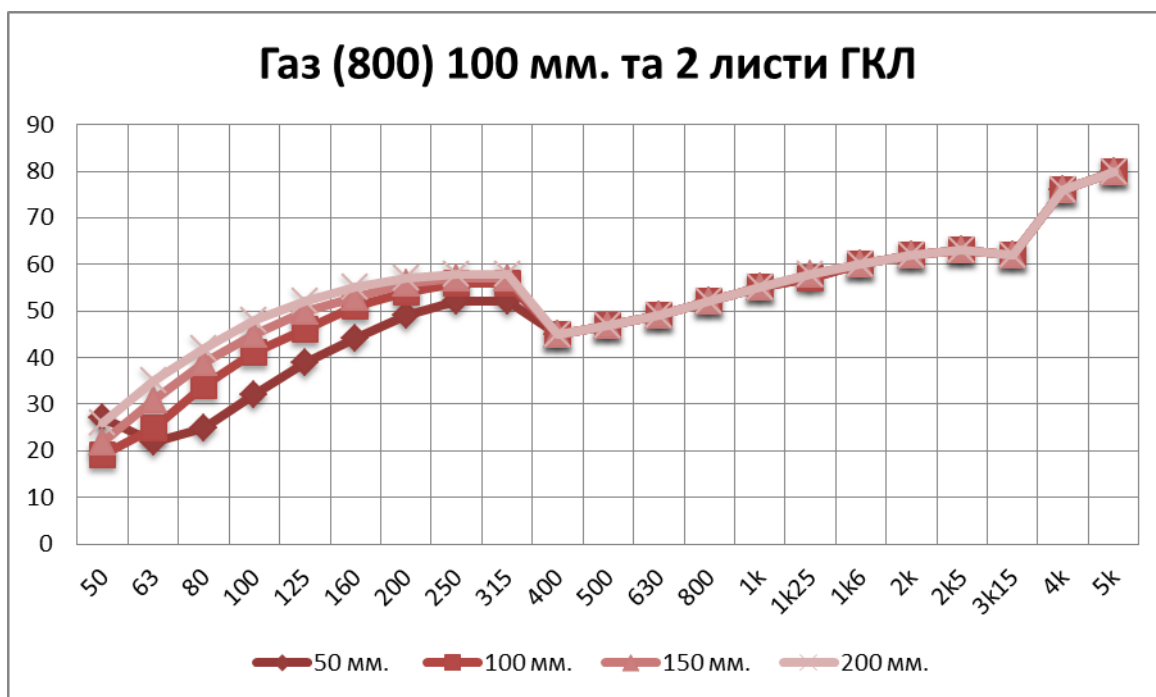


Рис. Б. 31. Частотна характеристика багат шарової стінової конструкції на основі газобетонного блоку 100 мм. та 2 листів ГКЛ, при зміні товщини прошарку ефективного звукопоглинального матеріалу.

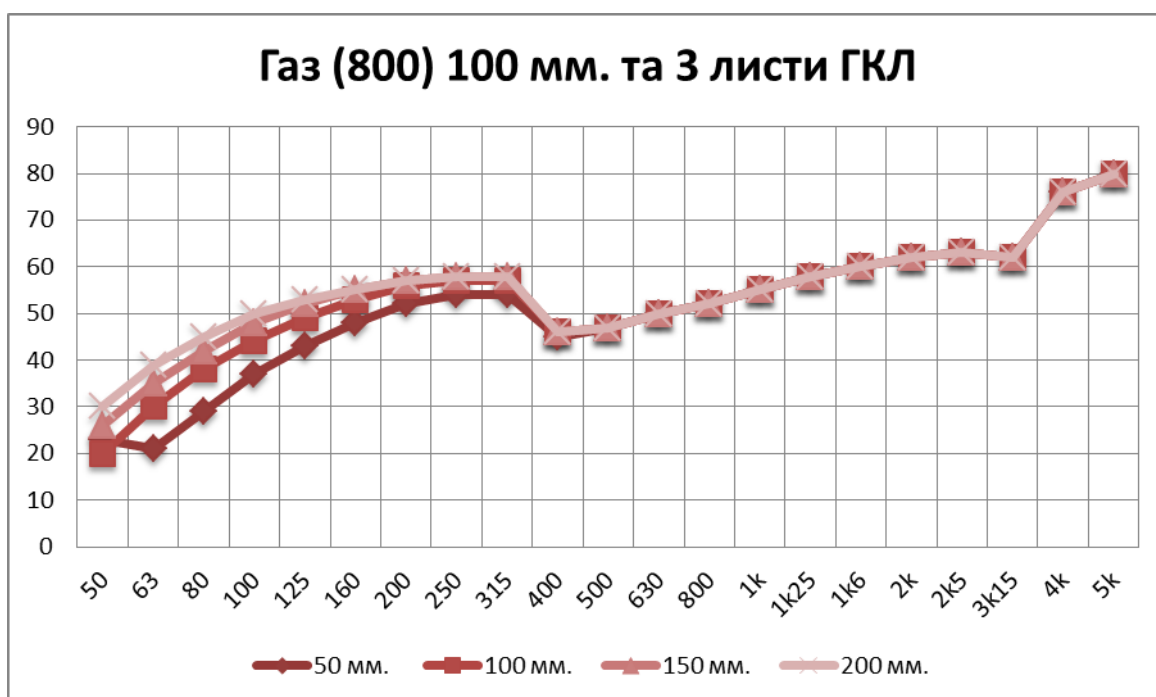


Рис. Б. 32. Частотна характеристика багат шарової стінової конструкції на основі газобетонного блоку 100 мм. та 3 листів ГКЛ, при зміні товщини прошарку ефективного звукопоглинального матеріалу.

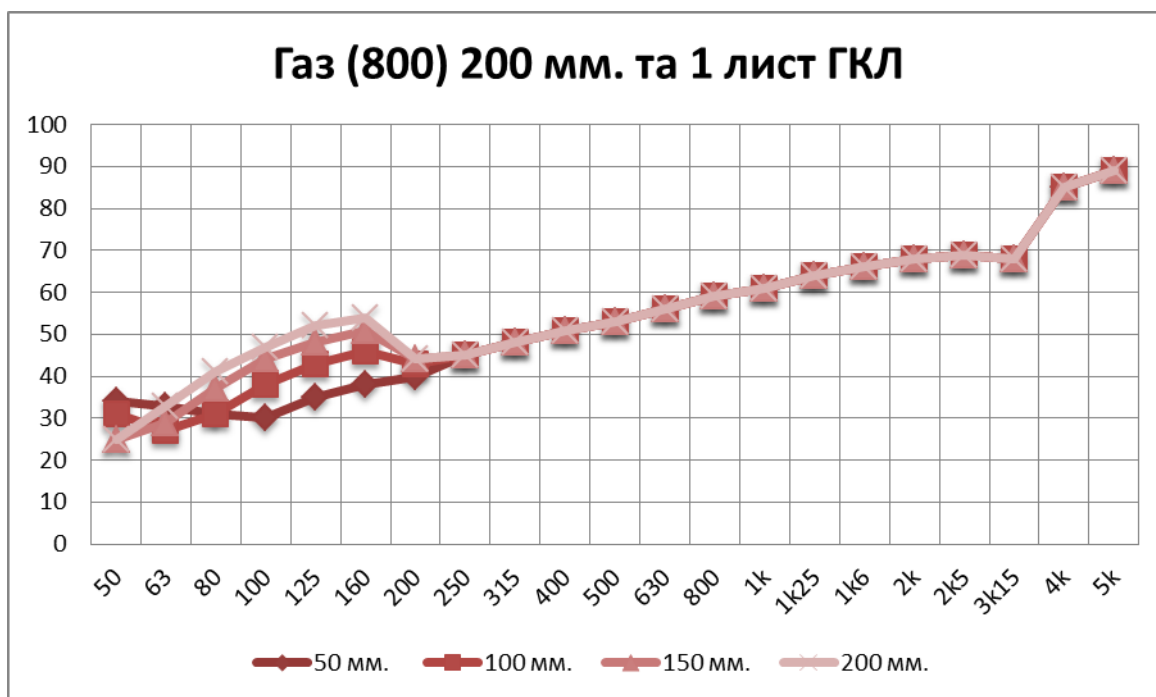


Рис. Б. 33. Частотна характеристика багатошарової стінової конструкції на основі газобетонного блоку 200 мм. та 1 листа ГКЛ, при зміні товщини прошарку ефективного звукопоглинального матеріалу.

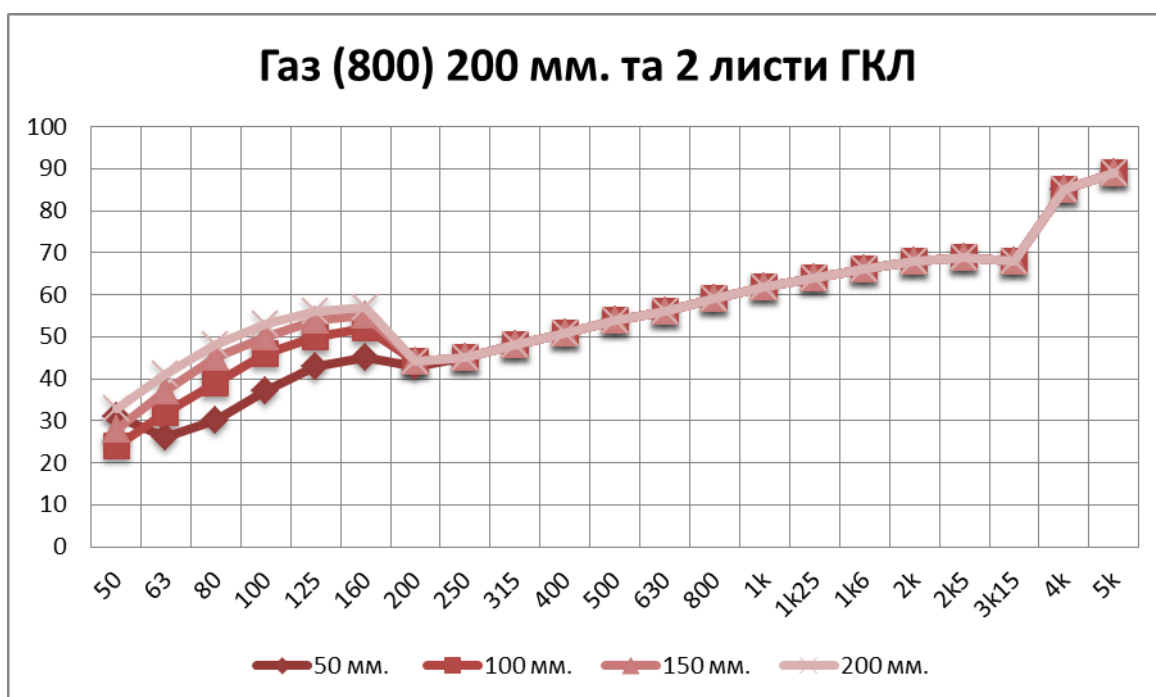


Рис. Б. 34. Частотна характеристика багатошарової стінової конструкції на основі газобетонного блоку 200 мм. та 2 листів ГКЛ, при зміні товщини прошарку ефективного звукопоглинального матеріалу.

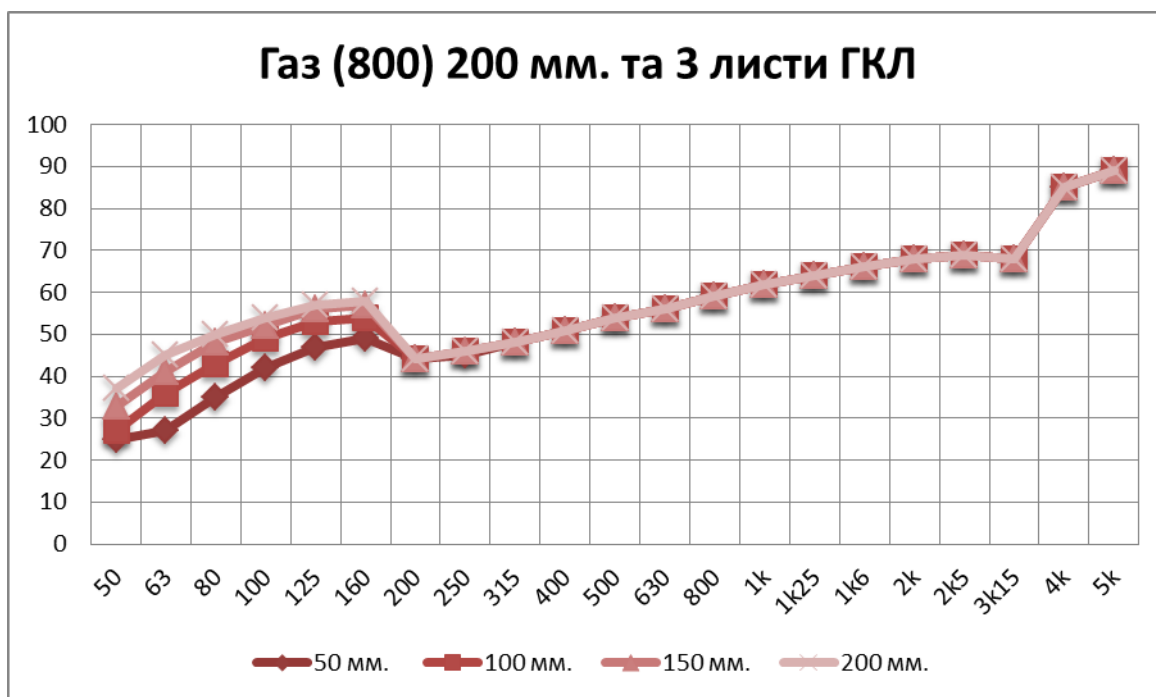


Рис. Б. 35. Частотна характеристика багатошарової стінової конструкції на основі газобетонного блоку 200 мм. та 3 листів ГКЛ, при зміні товщини прошарку ефективного звукопоглинального матеріалу.

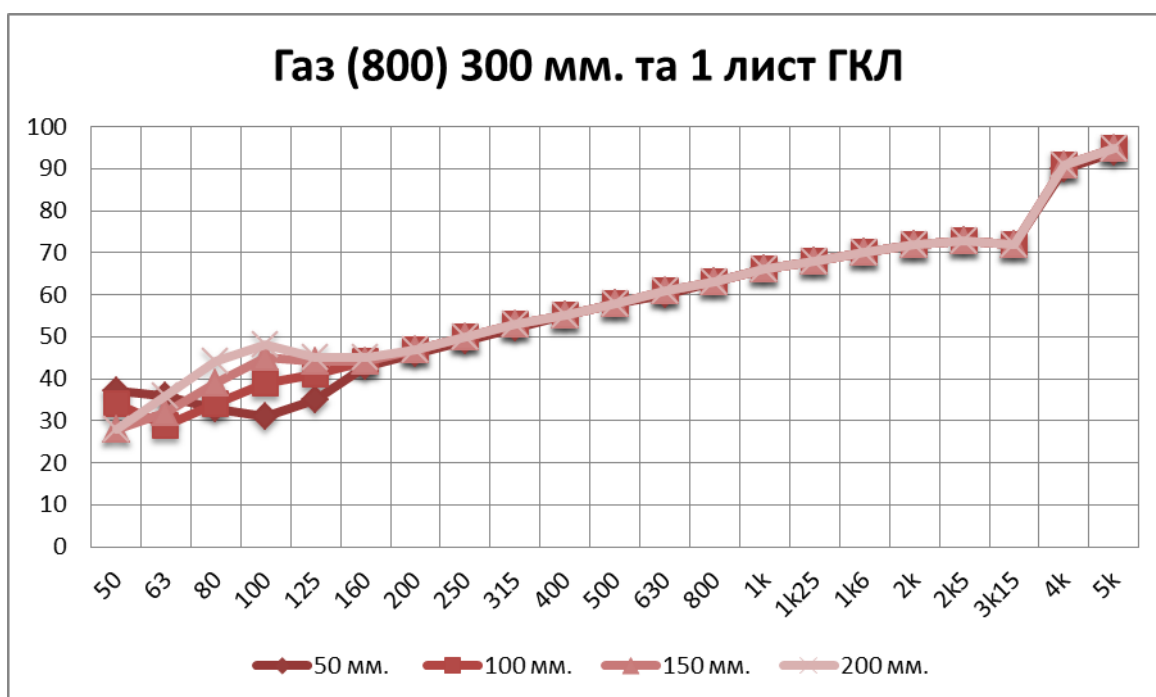


Рис. Б. 36. Частотна характеристика багатошарової стінової конструкції на основі газобетонного блоку 300 мм. та 1 листа ГКЛ, при зміні товщини прошарку ефективного звукопоглинального матеріалу.

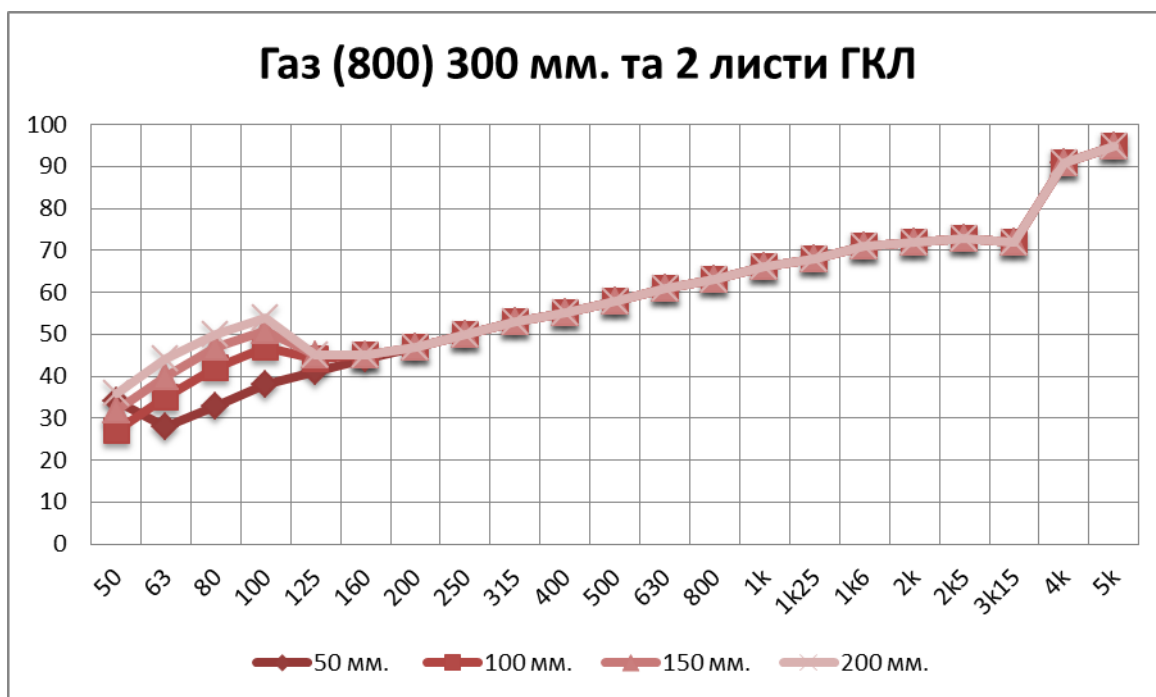


Рис. Б. 37. Частотна характеристика багатошарової стінової конструкції на основі газобетонного блоку 300 мм. та 2 листів ГКЛ, при зміні товщини прошарку ефективного звукопоглинального матеріалу.

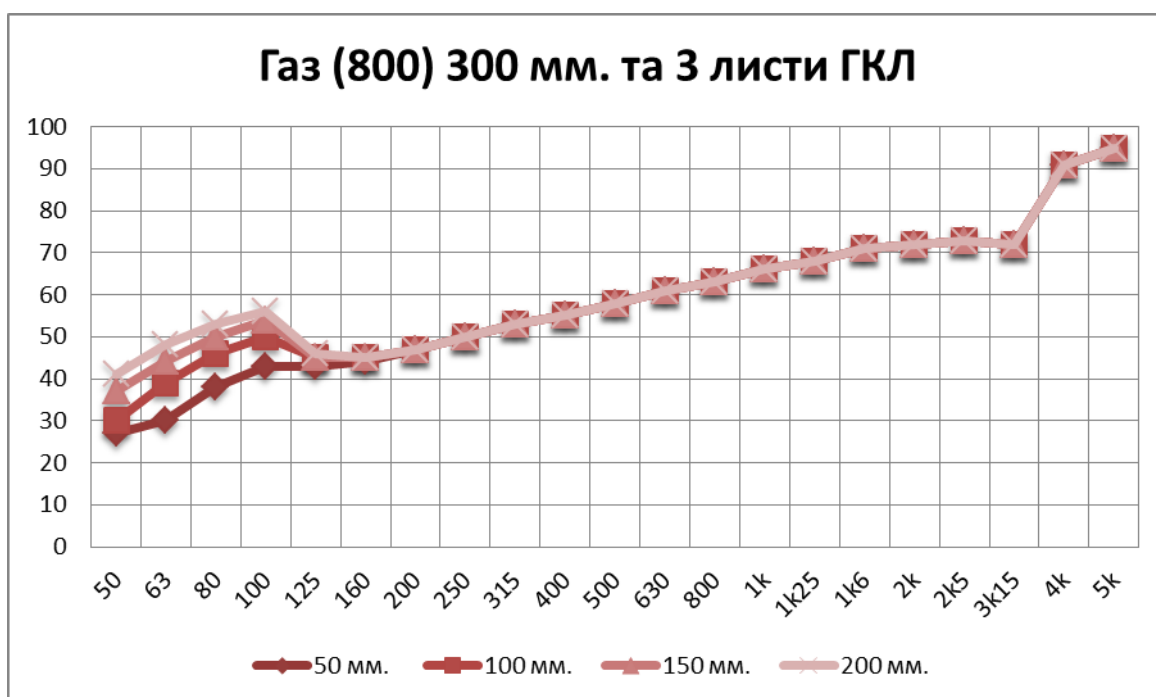


Рис. Б. 38. Частотна характеристика багатошарової стінової конструкції на основі газобетонного блоку 300 мм. та 3 листів ГКЛ, при зміні товщини прошарку ефективного звукопоглинального матеріалу.