



Doi: <https://doi.org/10.33644/2313-6679-3-2024-6>

УДК 628.517



БІДА Д. В.

Канд. техн. наук, старший науковий співробітник, ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій», м. Київ, Україна
Тел.: +38 (063) 930 11 92
e-mail: d.bida@ndibk.gov.ua
ORCID: 0000-0001-5185-0927



ДІДКОВСЬКИЙ В. С.

Доктор техн. наук, професор, Кафедра акустичних та мультимедійних електронних систем, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна
e-mail: v.didkovskyi@gmail.com
ORCID: 0000-0002-0807-822X

РОЗРАХУНОК ЗВУКОІЗОЛЯЦІЇ БАГАТОШАРОВИХ КОНСТРУКЦІЙ

АНОТАЦІЯ

Останнім часом проблема захисту від шуму стала актуальною через збільшення кількості транспорту в містах та його потужності. Одним із ефективних рішень є використання звукоізолюючих конструкцій, зокрема багатошарових, які поєднують щільні матеріали, що відбивають звук, та легкі звукопоглинальні матеріали. Однак існуючі методи розрахунку звукоізоляції не враховують особливості однорідних товстих і важких конструкцій. Запропоновано новий метод, який розглядає конструкції як двошарові: перший шар – основна конструкція з твердих матеріалів (бетон або цегла), другий – облицювальний шар із звукопоглинальними властивостями. Запропонований метод дозволяє за фізичними та геометричними властивостями огороження визначити його частотну характеристику звукопоглинання. Розроблена математична модель враховує масу, товщину матеріалів та ефект резонансу для точного розрахунку звукоізоляційних характеристик. Система рівнянь враховує різні діапазони мас матеріалів для розрахунку звукоізоляції. Проведено розрахунки для різних комбінацій матеріалів, таких як цегла, акустична вата і гіпсоволокнисті плити, що дозволило оцінити ефективність конструкцій в різних частот-

них діапазонах. Точність результатів розрахунків, які збігаються з експериментальними даними з похибкою ± 3 дБ, підтверджує надійність розробленого методу. Вона враховує товщину, масу та щільність конструкцій, дозволяючи інженерам обирати оптимальні матеріали для досягнення необхідного рівня звукоізоляції.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: звукоізоляція, рівні шуму, захист від шуму, багатошарові конструкції, звукоізоляційні перегородки, звукоізоляційні матеріали.

ABSTRACT

Recently, the problem of noise protection has become relevant due to the increase in the number of vehicles in cities and their capacity. One of the effective solutions is the use of sound-insulating structures, in particular multilayer ones. They combine dense sound-reflecting materials and lightweight sound-absorbing materials. However, the existing methods of calculating sound insulation do not take into account the peculiarities of uniform thick and heavy structures. A new technique is proposed, which considers structures as two-layered: the first layer is the main structure made of solid materials (concrete or brick), the second is a facing layer with sound-



absorbing properties. The proposed method allows determining the frequency characteristics of sound absorption based on the physical and geometric properties of the enclosure. The developed mathematical model takes into account the mass, thickness of materials and the effect of resonance for accurate calculation of soundproofing characteristics. The system of equations takes into account different ranges of material masses to calculate sound insulation. Calculations were carried out for various combinations of materials, such as brick, acoustic wool and gypsum fiber boards, which allowed to evaluate the effectiveness of structures in different frequency ranges. The accuracy of the calculation results, which coincide with the experimental data with an error of ± 3 dB, confirms the reliability of the developed methodology. It takes into account the thickness, mass and density of structures, allowing engineers to choose the optimal materials to achieve the required level of sound insulation.

KEYWORDS: sound insulation, noise levels, noise protection, multi-layer constructions, sound insulation partitions, sound insulation materials.

ВСТУП

Останнім часом виникла проблема захисту від шуму у зв'язку зі збільшенням кількості транспорту в містах та його потужності. Одним із способів захисту від шуму є використання звукоізолюючих конструкцій.

Питанням використання та розрахунку різного типу звукоізолюючих конструкцій присвячені роботи [1-3, 6]. Найбільш ефективними показали себе багатошарові конструкції, в яких високий рівень звукоізоляції досягається завдяки поєднанню щільних матеріалів, які відбивають звук, і легких матеріалів, які його поглинають. Відомі методи розрахунку багатошарових конструкцій належать Шарпу, Фахі [4, 5, 9].

Але в цих методах не враховано особливості однорідних товстих і важких конструкцій, у зв'язку з цим запропоновано метод, який враховує їх недоліки. Суть методу полягає в поділі конструкції на два шари з різними властивостями.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

З урахуванням вищезазначеного, у роботі [6] запропоновано новий метод для розрахунку звукоізоляції будівельних конструкцій, який містить експериментальні та змодельовані результати. Цей метод полягає в поділі конструкції на два шари з різними властивостями.

Перший шар – це основна існуюча конструкція, що складається з твердих матеріалів, таких як бетон або цегляна кладка. Цей шар забезпечує основну звукоізоляцію за рахунок своєї маси та щільності.

Другий шар – це облицювальний матеріал з

додатковими звукопоглинальними властивостями. До нього можуть входити гіпсоволокнисті плити, керамзитні плити або плити на основі кварцевого піску у поєднанні із звукопоглинальними матеріалами, такими як мінеральна вата, базальтова вата або войлок. Цей шар забезпечує додаткове поглинання звуку, що проходить через перший шар.

Грунтуючись на відомих формулах та методах розрахунків [6], розроблена математична модель наступного вигляду:

$$\begin{cases} R = R_1 + R_2 + C_{1,2} & f \leq 250 \text{ Гц} \\ R = R_1 + R_2 + C_{1,2} - 9 & 250 \geq f \geq 2500 \text{ Гц} \\ R = R_1 + R_2 + C_{1,2} + 9 & f \geq 2500 \text{ Гц} \end{cases}, (1)$$

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:

$$C_1 = 10 \lg \left(\frac{m_1 + 2m_2}{f(h_1 + h_2)} \right) - 20 \lg \left(\frac{m_1}{m_2} \right), \quad (2)$$

$$C_2 = 10 \lg \left(\frac{m_1 + 2m_2}{f(h_1 + h_2)} \right) - 10 \lg (R_1 - R_2), \quad (3)$$

де m_1 – поверхнева маса першого (існуючого, масивного) «шару» будівельної конструкції, кг/м^2 ; m_2 – поверхнева маса другого (додаткової звукоізоляції) «шару» будівельної конструкції, кг/м^2 ; h_1 – товщина першого «шару» будівельної конструкції, м; h_2 – товщина другого «шару» будівельної конструкції, м; f – частота, на якій проводяться розрахунки, згідно з третиннооктавною полосною частот, Гц.

В контексті розробленого методу для розрахунку звукоізоляції будівельних конструкцій варто зазначити, що кожна система рівнянь є релевантною для різних діапазонів поверхневої маси першого шару існуючої конструкції. Система рівнянь з коефіцієнтом C_1 (2) застосовується до будівельних конструкцій, у яких поверхнева маса першого шару (існуючої перегородки) лежить у межах від 100 до 400 кг/м^2 . Цей діапазон є оптимальним для досягнення необхідних звукоізоляційних властивостей, оскільки матеріали з поверхневою масою нижче 100 кг/м^2 не забезпечують достатнього рівня звукоізоляції і, відповідно, не повинні використовуватися для цих цілей. Система рівнянь C_1 підходить для матеріалів, у яких поверхнева маса не перевищує 400 кг/м^2 .



Система рівнянь з коефіцієнтом C_2 (3) використовується для матеріалів з поверхневою масою понад 400 кг/м². Ця система враховує більш високий рівень маси, що дозволяє розрахувати звукоізоляцію для конструкцій з більшим ступенем захисту від звуку. Показники R_1 та R_2 визначаються відповідно до [7, 8].

Цей підхід забезпечує точний розрахунок звукоізоляційних характеристик огорожувальних конструкцій, що дозволяє проєктувальникам і інженерам приймати обґрунтовані рішення щодо вибору матеріалів і конструкцій для досягнення необхідного рівня звукоізоляції. Коефіцієнти C_1 та C_2 (у формулах 2 і 3), які містять логарифмічні вирази залежно від товщини (h) і маси (m) шарів, мають важливу роль у розрахунках звукоізоляційних характеристик багатошарових конструкцій. Вони потрібні для компенсації ефекту резонансу в системі облицювання, що дозволяє точніше визначити вплив звукопоглинальних матеріалів на загальну звукоізоляцію.

Розрахунки систем, що містять комбінації цегли, акустичної вати і гіпсоволокнистих плит (ГКЛ), проводилися за формулами (1), (2), (3). Ці розрахунки охоплювали такі комбінації:

Система 1: Цегла 120 мм + 50 мм акустичної вати + 2 шари ГКЛ;

Система 2: Цегла 240 мм + 50 мм акустичної вати + 2 шари ГКЛ;

Система 3: Цегла 120 мм + 100 мм акустичної вати + 2 шари ГКЛ;

Вихідними даними для розрахунків було прийнято: поверхнева маса цегли товщиною 120 мм була прийнята як 200 кг/м²; поверхнева маса цегли товщиною 240 мм була прийнята як 400 кг/м²; поверхнева маса двох шарів гіпсоволокнистих плит і вати (незалежно від товщини) приймалася як 31 кг/м².

Результати розрахунків:

Отримані значення для звукоізоляції різних систем наведені в табл. 1-3. Розрахунки

Таблиця 1 – Частотна характеристика системи 1:120 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 2 – Частотна характеристика системи 2:240 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 3 – Частотна характеристика системи 3:120 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

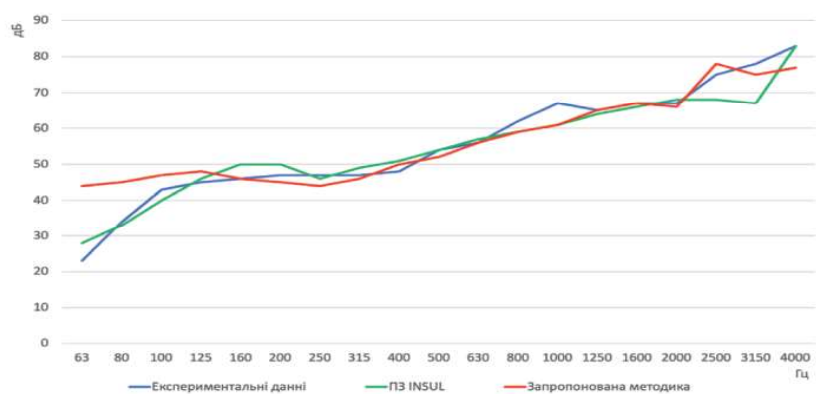


Рисунок 1 – Порівняння частотних характеристик, отриманих за допомогою ПЗ INSUL, експериментально та пропонуванім методом для системи 1

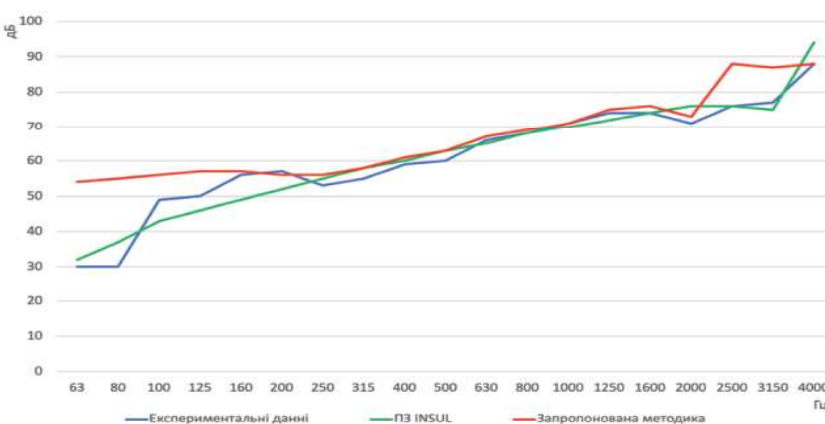


Рисунок 2 – Порівняння частотних характеристик, отриманих за допомогою ПЗ INSUL, експериментально та пропонуванім методом для системи 2

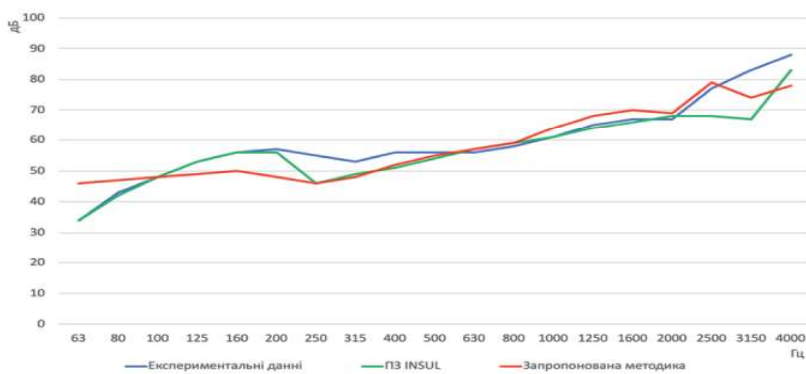


Рисунок 3 – Порівняння частотних характеристик, отриманих за допомогою ПЗ INSUL, експериментально та пропонуванім методом для системи 3

проводилися в октавному спектрі частот для кращого розуміння звукоізоляційних характеристик у різних частотних діапазонах.

Цей підхід дозволяє оцінити ефективність кожної з конструкцій з точки зору її звукоізоляційних властивостей, враховуючи як масу, так і товщину матеріалів. Оскільки ефект резонансу може суттєво впливати на звукоізоляційні показники, особливо в багатошарових системах, використання логарифмічних виразів для коефіцієнтів S є важливим для отримання точних результатів.

Порівняння. На рис. 1-3 зображено частотні характеристики для системи 1, що складається з цегли 120 мм + 50 мм акустичної вати + 2 шари ГКЛ, системи 2 (цегла 240 мм + 50 мм акустичної вати + 2 шари ГКЛ), та системи 3 (цегла 120 мм + 100 мм акустичної вати + 2 шари ГКЛ), отримані трьома методами: розрахунком з використанням програмного забезпечення (ПЗ) Insul [10], з натурних експериментів [8] та розрахунком запропонованим методом [6].

ВИСНОВКИ

1. Розроблений метод розрахунку звукоізоляції є високонадійним та точним інструментом для аналізу та оцінки звукового перекриття в будівлях та конструкціях. Однією з ключових властивостей цього нового методу є її відповідність результатам натурних експериментів.
2. Запропонований метод дозволяє за фізичними та геометричними властивостями огороження визначити його частотну характеристику звукопоглинання.
3. Результати порівняння розрахункових величин індексів звукоізоляції, отриманих з використанням запропонованого методу та отриманих експериментальним

шляхом, становлять ± 3 дБ, що відповідає точності розрахунку з застосуванням програми INSU, яка є світовим лідером в даній області.

4. Основною відмінністю та вагомим фактором коректності розробленого методу, в порівнянні з іншими, є урахування товщин, мас та щільності звукоізоляційної конструкції (див. коефіцієнти $C1$ та $C2$ у [7] та [8]), що дає можливість більш точно врахувати всі фізичні параметри використуваних матеріалів.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Котенко С. Г. Про акустичний комфорт малих придорожніх готелів. Системи обробки інформації. 2014. № 7. С. 32-40. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/soi_2014_7_9
2. Gomperts, M. C. Kihlman, T. The Sound Transmission Loss of Circular and Slit-Shaped Apertures in Walls. Acta Acustica united with Acustica. 1967. № 18 (3). P. 144-150
3. Дідковський В.С., Луньова С.А., Богданов О.С. Архітектурна акустика. Навчальний посібник. Київ: КПІ, 2012. 78 с.
4. J. Kristensen, J.H. Rindel. Bygningssakustik. Teori og praksis. SBI-anvisning 166, Statens Byggeforskningsinstitut, SBI, Hørsholm, 1989. (Translation to English available from JHR).
5. F.Fahy. Sound and Structural Vibration Radiation. Transmission and Response, London: Academic Press, 1985. 656 p.
6. Біда Д.В. Методи розрахунку звукоізоляції багатошарових конструкцій: дис. д-ра філософії в галузі фіз.-мат. наук: 171. Київ, 2024. 147 с.
7. ДСТУ-Н Б В.1.1-34:2013. Настанова з розрахунку та проектування звукоізоляції огорожувальних конструкцій житлових і громадських будинків. Київ: Мінрегіон України, 2014. 92 с.
8. ISO 16283-1:2014. Acoustics. Field measurement of sound insulation in buildings and of building elements. Part 1: Airborne sound insulation. Geneva: ISO, 2014. 15 p.
9. Rasmussen B. Sound insulation between dwellings. Requirements in building regulations in Europe. Applied Acoustics. 2010. № 71 (4). P. 373-385.
10. Predict transmission loss, impact sound, and rain noise. Available at: <http://www.insul.co.nz/features/> Дата звернення: 4.09.2024



REFERENCES

1. Kotenko, S. G. (2014). On the acoustic comfort of small roadside hotels. *Information Processing Systems*, (7), 32-40.
2. Gomperts, M. C., & Kihlman, T. (1967). The sound transmission loss of circular and slit-shaped apertures in walls. *Acta Acustica united with Acustica*, 18(3), 144-150.
3. Didkovskyi, V. S., Luniova, S. A., & Bohdanov, O. S. (2012). *Architectural acoustics*. Kyiv: KPI.
4. Kristensen, J., & Rindel, J. H. (1989). *Bygningsakustik. Teori og praksis [Building acoustics: Theory and practice]*. Hørsholm: Statens Byggeforskningsinstitut (SBI). (Translation to English available from JHR).
5. Fahy, F. (1985). *Sound and structural vibration: Radiation, transmission, and response*. London: Academic Press.
6. Bida, D. V. (2024). *Methods for calculating soundproofing of multilayered structures*. (Doctoral dissertation). Kyiv.
7. DSTU-NBV.1.1-34:2013. (2014). *Guidelines for the calculation and design of soundproofing for enclosure structures in residential and public buildings*. Kyiv: Minrehion Ukrainy.
8. ISO 16283-1:2014. (2014). *Acoustics: Field measurement of sound insulation in buildings and of building elements. Part 1: Airborne sound insulation*. Geneva: ISO.
9. Rasmussen, B. (2010). Sound insulation between dwellings: Requirements in building regulations in Europe. *Applied Acoustics*, 71(4), 373-385.
10. Predict transmission loss, impact sound, and rain noise. (2024). Retrieved from <http://www.insul.co.nz/features/>

Стаття надійшла до редакції 5.08.2024