

УДК 534.2

Н.О. Самійленко

Розрахунок звукоізоляції повітряного шуму непрямої дії

В статті приведено огляд основних методів розрахунку звукоізоляції повітряного шуму непрямої дії, а також показано значення непрямої дії у рамках задачі визначення загальної звукоізоляції будівель. Результати дослідження, приведені у вигляді основних формул, дають змогу кількісно оцінити вплив звукоізоляції непрямої дії на рівень шуму у суміжних приміщеннях.

The overview of the main methods for calculating flanking airborne noise, and the value of flanking noise under the problem of determining the overall sound insulation of buildings are given in these materials. The results are presented in the form of basic formulas allow to quantify the flanking sound insulation on noise levels in adjacent areas.

Ключові слова: звукоізоляція, шум, індекс ізоляції повітряного шуму, звукоізоляція повітряного шуму непрямої дії.

Вступ

Звукоізоляційні властивості огорожуючих конструкцій, виміряні в лабораторних умовах, відрізняються від характеристик, які отримуються в натурних умовах. На їх значення впливають наступні фактори:

- акустичні параметри приміщення (час реверберації, об'єм приміщення);
- вузли та примикання огорожуючих конструкцій до інших елементів будівлі;
- якість виконання монтажних робіт.

Найважливішим з приведених вище факторів є передача звукової енергії через вузли примикання, так звана флангова передача звуку.

Схематичне зображення проходження звуку між двома кімнатами зображене на рис. 1. Для ілюстрації внеску флангової передачі у загальну звукоізоляцію огорожуючої конструкції приведено частотну характеристику звукоізоляції монолітної перегородки, виміряну в лабораторних і натурних умовах [1].

В даному випадку, погіршення звукоізоляційних властивостей перегородки на низьких частотах досягає 15 дБ і обумовлює незадовільність конструкції для використання в житловому будівництві.

В державних будівельних нормах, які діють на території України, і які нормують порядок ро-

зрахунку звукоізоляції огорожуючих конструкцій в будівництві, врахування непрямої передачі шуму не здійснюється і її вплив не нормується [2].

1. Вітчизняні дослідження непрямої передачі шуму

В радянських та українських джерелах питання врахування непрямого шуму приведено в роботах [1, 3, 4].

Коротко принцип урахування непрямого звуку описується наступним.

Звукове поле, що виникає в повітрі приміщення з джерелом шуму, впливає на всі його огорожуючі конструкції. Коливання розповсюджуються по конструкції споруди в сусідні та більш віддалені приміщення. Випромінювання звукової енергії огороженнями, що коливаються, в цих приміщеннях створюють в них звукове поле. Основні шляхи структурної передачі звуку між сусідніми приміщеннями показано на рис 1.

Основними елементами, які знижують рівні шуму, що розповсюджуються по споруді, є стики та вузли, в яких з'єднуються перпендикулярно розташовані конструкції.

Згідно з теперішніми уявленнями, в плиті, коливання якої збуджені звуковим полем або точковим джерелом вібрації, встановлюється дифузне поле згинальних коливань, що пов'язано з відбиттям хвиль від стиків та вузлів з'єднання плити з іншими конструкціями. Частина енергії коливань хвиль, що падають під довільними кутами на лінію стика чи вузла, відбивається, а частина передається в суміжні елементи. В загальному випадку в цих елементах збуджуються згинальні, поздовжні та поперечні (здвигові) хвилі, а також згинальні хвилі, що швидко затухають (ближнє поле).

Передача звукової енергії в суміжні елементи характеризується коефіцієнтом передачі τ . Коефіцієнт передачі вібрації [1] визначається як зниження коливальної швидкості при переході через стик i -го огороження до j -го, який характеризується відношенням квадратів віброшвидкостей:

$$\tau_{ij} = v_j^2 / v_i^2. \quad (1)$$

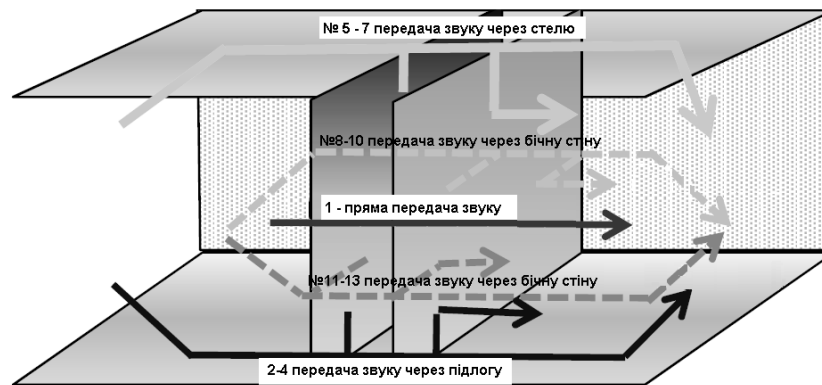
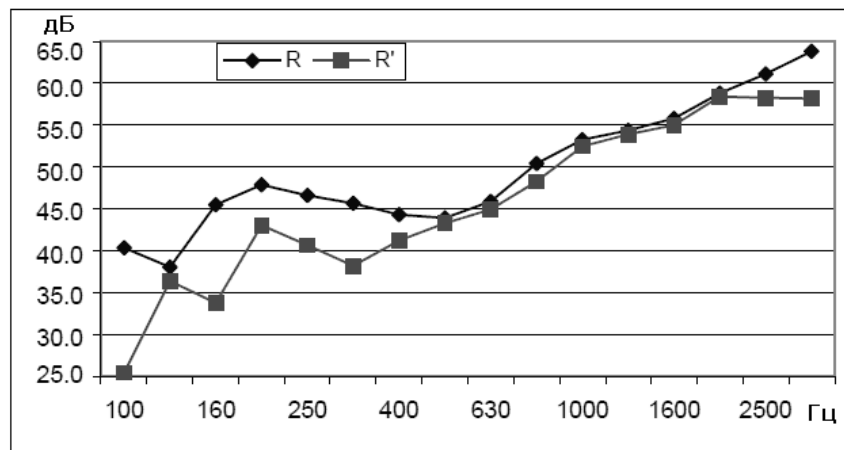


Рис.1. Шляхи передачі звуку між двома сусідніми приміщеннями

Рис. 2. Частотна характеристика звукоізоляції монолітної перегородки: R - отримана в лабораторних умовах, R' - отримана в натурних умовах

За такого визначення різниця рівнів вібрації двох розділених стиком конструкцій пов'язана з коефіцієнтом передачі співвідношенням:

$$\Delta L_V = L_{Vi} - L_{Vj} = 10 \lg \frac{1}{\tau_{ij}}. \quad (2)$$

Коефіцієнти передачі вібрації в хрестоподібному вузлі споруди, визначені без урахування розповсюдження поздовжніх хвиль для жорстко зв'язаних між собою тонких плит, дорівнюють:

- при передачі вібрації між елементами, суміжним під прямим кутом;
- при передачі вібрацій між елементами, розташованим вздовж однієї осі:

$$\tau_{1,2} = \frac{\frac{c_2}{c_1} \cdot \frac{h_2}{h_1}}{4 \left[\frac{\rho_2}{\rho_1} \right]^2 \cdot \left[\frac{c_2}{c_1} \right]^3 \cdot \left[\frac{h_2}{h_1} \right]^5 + 8 \frac{\rho_2}{\rho_1} \left[\frac{c_2}{c_1} \right]^{1,5} \cdot \left[\frac{h_2}{h_1} \right]^{2,5} + 5}; \quad (3)$$

$$\tau_{1,2} = \frac{1}{4 \left[\frac{\rho_2}{\rho_1} \right]^2 \cdot \left[\frac{c_2}{c_1} \right]^3 \cdot \left[\frac{h_2}{h_1} \right]^5 + 8 \frac{\rho_2}{\rho_1} \left[\frac{c_2}{c_1} \right]^{1,5} \cdot \left[\frac{h_2}{h_1} \right]^{2,5} + 5}; \quad (4)$$

де ρ_1, ρ_2 - густини матеріалу першої та другої плит; c_1, c_2 - швидкості поздовжніх хвиль в першій та другій плитах; h_1, h_2 - товщина першої та другої плит (перша та друга плити розташовані під прямим кутом одна до одної, збудженню підлягає перша плита).

Ці формули справедливі в тому випадку, коли коефіцієнти передачі вібрацій усереднюються в достатньо широких полосах частот (вимі-

рювання проводяться з використанням широкополосних фільтрів). В цьому випадку коефіцієнти передачі вібрацій виявляються незалежними від частоти.

Знаючи коефіцієнт передачі вібрацій в вузлах, можна визначити збільшення рівня звукового тиску в приміщенні ΔL , або зниження звукоізоляції ΔR , викликане непрямою передачею звуку конструкціями [1]:

$$\Delta R = -10 \lg \left\{ 1 + \sum_{i=6}^9 [10^{0,1(R_1-R_i)} \tau_{i,1} + \frac{S_{i-4}}{S_1} (\tau_{1,i-4} + 10^{0,1(R_1-R_i)} \tau_{i,i-4})] \right\}, \quad (5)$$

де $i = 6 \dots 9$ - номер флангової конструкції в приміщенні з джерелом звуку; R_1 та S_1 - відповідно звукоізоляційна здатність та площа основної, розділяючої суміжні приміщення, конструкції; R_i - звукоізоляційна здатність флангової конструкції з номером i в приміщенні з джерелом звуку; $\tau_{i,1}$ - коефіцієнт передачі вібрацій від флангової конструкції з номером i в приміщенні з джерелом звуку основної (першої) конструкції; $\tau_{1,i-4}$ - коефіцієнт передачі вібрацій від основної конструкції до флангової з номером $i-4$; $\tau_{i,i-4}$ - коефіцієнт передачі вібрацій від флангової конструкції з номером i в приміщенні з джерелом звуку фланговій конструкції з номером $i-4$ в приміщенні, що ізолюється.

З формули видно, що вплив непрямої передачі звуку зростає зі збільшенням звукоізоляційної здатності основної конструкції порівняно з фланговими, коефіцієнтів передачі вібрацій та відношень площин флангових конструкцій в приміщенні, що ізолюється, до площі основного огороження.

Таким чином, урахування непрямого звуку зводиться до визначення коефіцієнтів передачі τ .

В роботі [1] коефіцієнти передачі вібрації визначаються для найпростіших елементів споруди у вигляді системи тонких плит, жорстко зв'язаних між собою в вузлах. В іншому напрямку передбачається, що плити необмежені.

Оскільки передача вібрацій здійснюється не тільки згинальними коливаннями, а й поздовж-

німи, а при переході через вузол відбувається часткова трансформація одних хвиль в інші, коефіцієнти передачі вібрацій мають бути перераховані.

Досліди і вимірювання показали, що розрахунок коефіцієнтів передачі вібрації в плити, розташованих перпендикулярно до збуджуючої плити, можна здійснювати для будь-яких частот в області застосування теорії згинальних коливань тонких плит без урахування поздовжніх хвиль. За умови розрахунку коефіцієнтів передачі вібрації в плити, паралельні збуджуючій плиті, достатньо прийняти до уваги поздовжні коливання в плитах, перпендикулярних збуджуючій плиті.

Однак, приведені вище дослідження стосуються тільки споруд з монолітних матеріалів, а сучасне будівництво з часом переходить на легкі конструкції, методику розрахунку непрямої передачі через які вище наведені твердження не охоплюють. Тому варто зупинитися на дослідженнях зарубіжних вчених.

2. Зарубіжні дослідження непрямої передачі шуму

Одна з перших теорій врахування непрямої передачі звуку серед іноземних авторів була представлена Гетерсоном [5] в 1979. Розрахунок звукоізоляції непрямого шуму здійснювався методом статистичного енергетичного аналізу для двох сусідніх кімнат. Пізніше, ця модель була доповнена [6,7]. Робота Гетерсона лягла в основу Європейського стандарту EN 12354 [8]. Дослідження непрямої передачі звуку здійснювалися Л. Кремером, В. Вестфалем, М. Хеклом

Сучасні дослідження непрямої передачі звуку для легких конструкцій, а також методи розрахунку коефіцієнту передачі вібрацій за допомогою статистичного аналізу та методу кінцевих елементів приведені в роботах [9-12] тощо. Жоден дослідний інститут не оминув цієї теми.

Зупинимось на базовій теорії, яку покладено в основу Європейських норм і стандартів.

3. Методика оцінки непрямого звуку згідно з EN 12354-1

Звукова енергія у суміжному приміщенні визначається як сума енергій, що випромінюється безпосередньо розділяючою перегородкою, і енергії, що випромінюється бічними структурними елементами.

Загальний коефіцієнт передачі звуку може бути розкладений на коефіцієнти передачі, що відносяться до кожного елементу у кімнаті: приймачі і елементи системи, що беруть участь у прямій і непрямій повітряній звуковій передачі.

Фактичний коефіцієнт звукоізоляції визначається як:

$$R' = -10 \lg \tau', \quad (6)$$

де τ' - загальний коефіцієнт передачі звукової енергії з одного приміщення в інше.

В свою чергу загальний коефіцієнт передачі визначається як сума складових прямої і непрямої передачі:

$$\tau' = \tau_d + \sum_{f=1}^n \tau_f + \sum_{e=1}^m \tau_e + \sum_{s=1}^k \tau_s, \quad (7)$$

де, τ_d - відношення звукової енергії, що випромінюється всією частиною розділяючою перегородки до звукової потужності, що падає на всі огороження приміщення з джерелом звуку. Вона включає шлях Dd – безпосередньо прямий шлях через перегородку та шляхи Fd – звук, що пройшовши по огороженням приміщення з джерелом звуку, передався на розділяючу перегородку і збудив акустичне поле в сусідньому приміщенні (рис.3); τ_f - відношення звукової енергії, що випромінюється фланкуючою конструкцією f в сусідній кімнаті, до енергії, що падає на всі огороження приміщення з джерелом звуку. Вона включає шлях Ff - звук, що пройшовши по огороженням приміщення з джерелом звуку, за виключенням розділяючої перегородки, передався на бокові огороження сусіднього приміщення та Df - звук, що пройшовши по розділяючій перегородці, передався на бокові огороження сусіднього приміщення (рис.3); τ_e - відношення звукової енергії, що випромінюється у сусідній кімнаті елементом у перегородці, що

розділяє приміщення (наприклад вентиляційна решітка, розетка, дверцята тощо), до енергії, що падає на загальну частину перегородки; τ_s - відношення звукової енергії, що випромінюється в кімнаті-приймачі, завдяки непрямій повітряній передачі системи елементів, на перегородках в приміщенні, куди передається звук, до енергії, що падає на огороження в приміщенні з джерелом звуку.

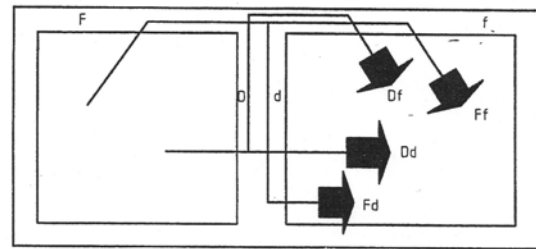


Рис.3. Позначення шляхів звукопередачі і між двома кімнатами

Таким чином, на відміну від вітчизняної методики, тут чітко розділено всі шляхи передачі звуку і розрахунок загальної звукоізоляції полягає у розрахунку кожного з складових компонентів.

Розглянемо їх окремо:

1. τ_d - коефіцієнт передачі звуку розділяючою перегородкою.

$$\tau_d = \tau_{Dd} + \sum_{F=1}^n \tau_{Fd}, \quad (8)$$

τ_{Dd} - коефіцієнт передачі звуку перегородкою, що потрапив безпосередньо на перегородку;

τ_{Fd} - коефіцієнт передачі звуку перегородкою, що потрапив на неї через бокові огорожуючі конструкції в приміщенні з джерелом звуку.

По аналогії з [1], τ_{Dd} - відповідає власна звукоізоляція перегородки R , а $\tau_{Fd} = \tau_{i,1}$.

В свою чергу

$$\tau_{Dd} = 10^{-R_{Dd}/10}, \quad (9)$$

де R_{Dd} - звукоізоляція перегородки;

$$\tau_{ij} = 10^{-R_{ij}/10}, \quad (10)$$

де R_{ij} - непряма звукоізоляція.

2. τ_f - коефіцієнт передачі звуку фланговими перегородками в приміщенні прийому:

$$\tau_f = \sum_{f=1}^n \tau_{Df} + \tau_{Ff}, \quad (11)$$

τ_{Df} - коефіцієнт передачі звуку, що потрапив на флангові конструкції через суміжну перегородку; τ_{Ff} - коефіцієнт передачі звуку, що потрапив на флангові конструкції, через бокові конструкції в приміщенні з джерелом звуку.

По аналогії з [1], τ_{Df} - відповідає коефіцієнт передачі $\tau_{1,i-4}$, а τ_{Ff} - $\tau_{i,i-4}$.

Коефіцієнти τ_{Ff} та τ_{Df} виражаються через звукоізоляцію згідно з формулою (10).

Звукоізоляція від непрямої передачі звуку визначається із відомих вихідних величин звукоізоляції флангових конструкцій, розмірів елементів та коефіцієнту віброізоляції між елементами конструкцій:

$$R_{ij} = \frac{R_{i,situ}}{2} + \Delta R_{i,situ} + \frac{R_{j,situ}}{2} + \Delta R_{j,situ} + \bar{D}_{v,ij,situ} + 10 \lg \frac{S_s}{\sqrt{S_i S_j}}, \quad \text{дБ}, \quad (11)$$

де $R_{i,situ}$ - фактичний рівень звукоізоляції i -го огороження від якого йде передача звуку на j -те огороження; де $R_{j,situ}$ - фактичний рівень звукоізоляції j -го огороження, на яке йде передача звуку від i -того огороження; S_s - площа розділяючої перегородки; S_i - площа i -го огороження; S_j - площа j -го огороження; $\bar{D}_{v,ij,situ}$ - усереднене значення різниці рівнів швидкостей між елементами i та j .

Таким чином саме $\bar{D}_{v,ij,situ}$ визначає втрати за рахунок проходження звуку через з'єднання конструкцій.

Величину $\bar{D}_{v,ij,situ}$ визначають за відомих або вимірним коефіцієнтом віброізоляції K_{ij} :

$$\bar{D}_{v,ij,situ} = K_{ij} - 10 \lg \frac{l_{ij}}{\sqrt{a_{i,situ} a_{j,situ}}}, \quad \text{дБ}, \quad (12)$$

$$\bar{D}_{v,ij,situ} \geq 0,$$

при чому

$$a_{i,situ} = \frac{2,2\pi^2 S_i}{c_0 T_{s,i,situ}} \sqrt{\frac{f_{ref}}{f}}, \quad a_{j,situ} = \frac{2,2\pi^2 S_j}{c_0 T_{s,j,situ}} \sqrt{\frac{f_{ref}}{f}},$$

де $a_{i,situ}$ - еквівалентна довжина поглинання i -го елемента в реальному полі, м; $a_{j,situ}$ - екві-

валентна довжина поглинання j -го елемента в реальному полі, м; f - центральна частота смуги, Гц; f_{ref} - опорна частота, Гц; c_0 - швидкість звуку в повітрі м/с; l_{ij} - загальна довжина зв'язку між елементом i та j ; $T_{i,situ}$ - структурний час реверберації елемента i в даному полі, с; $T_{j,situ}$ - структурний час реверберації елемента j в даному полі, с.

Для деяких конструкцій (див. 9) $a_{i,situ} = \frac{S_i}{l_0}$,

$a_{j,situ} = \frac{S_j}{l_0}$, де l_0 - опорна довжина $l_0 = 1$ м.

Таким чином, приведена методика розрахунку, як і методика [1] в роботах радянських вчених, включає урахування звукоізоляції 9-ти огорожень, і коефіцієнт віброізоляції $\bar{D}_{v,ij,situ}$ зв'язку між ними. Однак, на відміну від [1], методика [8] враховує залежність $\bar{D}_{v,ij,situ}$ від частоти, а також дозволяє користуватися коефіцієнтами K_{ij} отриманими емпірично. Розрахунок і визначенню коефіцієнтів віброізоляції з'єднань різних конструкцій присвячено багато робіт [9-12].

Коефіцієнт віброізоляції з'єднань K_{ij} визначається як різниця рівнів коливальних швидкостей через з'єднання у обох напрямках, за формулою:

$$K_{ij} = \frac{D_{v,ij} + D_{v,ji}}{2} + 10 \lg \frac{l_{ij}}{\sqrt{a_i a_j}} \quad \text{дБ}, \quad (13)$$

де $D_{v,ij}$ - різниця рівнів середньо напрямлених швидкостей між елементами i та j , коли елемент i збуджено, дБ; $D_{v,ji}$ - різниця рівнів середньо напрямлених швидкостей між елементами i та j , коли елемент j збуджено, дБ; a_i - еквівалентна довжина поглинання i -го елемента, м; a_j - еквівалентна довжина поглинання j -го елемента, м;

Коефіцієнти віброізоляції K_{ij} для типових з'єднань приведено в [8].

Висновки

Звукоізоляційні властивості огорожуючих конструкцій виміряні в лабораторних умовах, відрізняються від отриманих в натурних умовах, внаслідок непрямої передачі звуку.

Серед методик врахування непрямої передачі найзручнішою для практичного застосування є методика представлена в [8]. Оскільки вона пропонує зрозумілий механізм розрахунку, а також, дозволяє, шляхом накопичення емпіричних і теоретичних даних про R та K_{ij} , змінювати розрахунки автоматично згідно новими дослідженнями в цій галузі.

Література

1. Заборов В. И. Теория звукоизоляции ограждающих конструкций. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1969. – 181 с.
2. СНиП II-12-77 Защита от шума.– М.: Стройиздат, 1978.
3. Крейтан В. Г. Обеспечение звукоизоляции при конструировании жилых зданий. - М.: Стройиздат, 1980. – 173 с, ил.
4. Ковригин С. Д., Крышов С. И., Архитектурно - строительная акустика. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1986. – 256 с, ил.
5. E. Gerretsen, Calculation of the sound transmission between dwellings by partitions and flanking structures, Appl. Acoust. 12 1979 413-432.
6. E. Gerretsen, Calculation of airborne and impact sound insulation between dwellings, Appl. Acoust. 19 1986 245-264
7. E. Gerretsen, European developments in prediction models for building acoustics, Acta acustica 2 1994 205-214.
8. EN 12354-2 Building acoustics - Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements - Part 2: Impact sound insulation between rooms, Brussels, Belgium, 1999.
9. R. J. M. Craik, Sound transmission through buildings using statistical energy analysis, Gower Publishing Ltd, Hampshire, England, 1996.
10. R. J. M. Craik, T. R. T. Nightingale, J. A. Steel, Sound transmission through a double leaf partition with edge flanking, J. Acoust. Soc. Am. 101(2) 1997 964-969.
11. H. Olsen and M. J. Newman, Determination of sound reduction indices using intensity techniques in situ, Sintef Delab Report 40-A92045, Trondheim, Norway 1992.
12. Cocchi A., Semprini G. Sound Insulation and Flanking Transmission: from U. E. Directive 89/106 to the flanking transmission loss experimental measurement // Euronoise. – 2003.