

УДК 613.644

А.М. ЛИТВИНЕНКО, канд. техн. наук
В.М. ФАЛЕС
О.В. ХІВРИЧ, канд. військ. наук
Національний університет харчових технологій

ЗАХИСТ ВІД ВИРОБНИЧОГО ШУМУ

Проведено теоретичний, експериментальний та експлуатаційний аналіз звукоізоляції різних конструкцій промислових огорож. Показано, що найбільший звукоізоляційний ефект, при еквівалентній масі, мають подвійні (двошарові) конструкції.

Ключові слова: звукоізоляція, будівельні огорожі, конструкції, застосування, аналіз, практичні рекомендації.

Проведен теоретический, экспериментальный и эксплуатационный анализ звукоизоляции разных конструкций промышленных ограждений. Показано, что наибольшим звукоизоляционным эффектом, при эквивалентной массе, обладают двойные (двухслойные) конструкции.

Ключевые слова: звукоизоляция, строительные ограждения, конструкции, применение, анализ, практические рекомендации.

The theoretical, experimental and operational analysis of the industrial buildings noise isolation has been realized. It is shown that twin (two-layered) building constructions are the most effective noise isolation barriers.

Keywords: noise isolation, buildings barriers, application, analysis, practical recommendations.

© А.М. Литвиненко, В.М. Фалес, О.В. Хіврич, 2010

Ступінь фізіологічної дії шуму на людину залежить від багатьох факторів: гучності шуму, його частотного спектра, часу дії, характеру шуму, а також індивідуальних властивостей людини відносно сприйняття шуму.

Інтенсивний виробничий шум шкідливий не тільки як гігієнічний фактор, але й ускладнює організацію виробництва (ділове спілкування між робітниками, чутливість усних вказівок, попереджувальних та аварійних сигналів).

Розробка заходів по боротьбі з виробничим шумом повинна починатися на стадії проектування нових підприємств, технологічних процесів та машин. Зниження виробничого шуму на робочих місцях до допустимих рівнів являє собою складну технічну задачу, одним із напрямків вирішення якої є застосування будівельно-акустичних заходів та засобів.

Облицювання стін, стелі виробничого приміщення звукопоглинальними матеріалами слід застосовувати в комплексі з іншими методами зменшення шуму. Тільки акустичною обробкою приміщення не можна досягти істотного зниження шуму, що недостатньо для досягнення нормативних значень рівня шуму у малощумних виробничих приміщеннях суміжних із шумним цехом (дільницею): кабіни спостереження та дистанційного керування, звукоізолюючі кабіни та укриття для регламентованого відпочинку робітників шумних постів, кімнати керівництва та розміщення провідних спеціалістів цеху (дільниці) тощо.

Шум, що поширюється по повітрю, може бути суттєво знижений за допомогою улаштування на його шляху звукоізолюючих перешкод у вигляді стін, перегородок, перекриття, спеціальних звукоізолюючих кожухів і екранів. Суть звукоізоляційної огорожі полягає в тому, що найбільша частина падаючої звукової енергії, відбивається та поглинається в порах матеріалу огорожі і тільки незначна частина проникає через неї. Механізм передачі звуку, в цьому випадку, полягає в наступному: падаюча на огорожу звукова хвиля приводить її в коливальний рух з частотою, яка дорівнює частоті коливання повітря в хвилі — тобто сама огорожа стає джерелом звуку та випромінює його в ізолюєме приміщення. При цьому кількість звукової енергії, що проходить через огорожу, зростає із збільшенням амплітуди її коливань.

Предметом дослідження і аналізу в даній роботі є звукоізоляційні властивості будівельних огорож виробничих приміщень, які широко застосовуються для боротьби з середньо- та високочастотним шумом.

Перш за все, розглянемо одношарові звукоізолюючі огорожі. Так зветься конструкції, якщо вони виконані з однорідного будівельного матеріалу чи складені з декількох шарів різних матеріалів скріплених між собою жорстко по усій поверхні або з матеріалів з порівняльними акустичними

властивостями (наприклад, шар цегляної кладки та штукатурки). Звукоізоляційна характеристика одношарової огорожі у трьох частотних діапазонах наведена на рис. 1 [1].

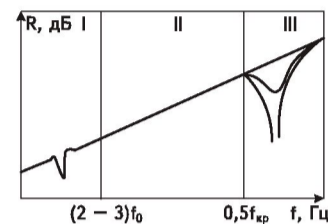


Рис. 1. Звукоізоляція одношарової огорожі в залежності від частоти звуку

На низьких частотах, порядку 20 – 63 Гц (частотний діапазон I), звукоізоляція огорожі визначається резонансними явищами, що виникають в ній. Області резонансних коливань огорож залежать від жорсткості і маси конструкції, фізичних властивостей матеріалу, характеру звукового поля тощо. Власна частота (f_0) більшості будівельних одношарових перегородок нижче 50 Гц. В першому частотному діапазоні розрахувати звукоізоляцію поки не вдається. Проте визначення звукоізоляції в цьому діапазоні не має принципового значення, тому що нормування рівня звукового тиску починається з частоти 63 Гц. Практично звукоізоляція у цьому діапазоні незначна внаслідок відносно значних коливань огорожі поблизу перших частот власних коливань, що графічно зображено у вигляді провалів звукоізоляції у першому частотному діапазоні.

На частотах, які у 2 – 3 рази перевищують власну частоту огорожі (частотний діапазон II), звукоізоляція визначається масою одиниці площі огорожі. Жорсткість огорожі в діапазоні II не впливає суттєво на звукоізоляцію. Теоретичні розрахунки звукоізоляційної здатності конструкцій огорож для випадку нормального падіння звуку на перешкоду та дифузійного поля викладені у роботі [2]. Проте зміну звукоізоляції можна також досить точно розрахувати за так званим «законом маси». Для орієнтовного визначення середньої величини звукоізоляції огорожі, різними авторами запропоновані емпіричні залежності, де за основний критерій оцінки звукоізолюючої здатності огорожі прийнята маса 1 м² її поверхні [3, 4].

На практиці для розрахунку використовують такі формули:

звукоізоляція конструкцій (R), що мають поверхневу густину $m \leq 200$ кг/м²,

$$R = 13,5 \lg m + 13, \text{ дБ}, \quad (1)$$

звукоізоляція конструкцій (R), що мають поверхневу густину $m > 200$ кг/м²,

$$R = 23 \lg m - 9, \text{ дБ}, \quad (2)$$

У частотному діапазоні III проявляється просторовий резонанс огорожі, при якому звукоізоля-

ція різко зменшується. Починаючи з деякої частоти звуку ($f < 0,5f_{кр}$), амплітуда коливань конструкції різко зростає. Це явище відбувається внаслідок збігу частоти вимушених коливань (частоти падаючої звукової хвилі) з частотою коливання огорожі.

Проаналізуємо умови досягнення просторового резонансу. Звукова хвиля при досягнанні легкої огорожі передає їй свою енергію та перетворюється у біжучу по поверхні, яка викликає вигинальну хвилю в перешкоді. Вигинальні коливання спостерігаються при певному співвідношенні між товщиною конструкції (h) та довжиною вигинальної хвилі (λ_b). В якості такого співвідношення можна застосувати нерівність ($\lambda_b > 6h$). При низьких частотах, коли ($\lambda_b \gg 6h$), обидва боки конструкції коливаються в одній фазі, подібно діафрагмі. На високих частотах — ($\lambda_b < 6h$) вигинальні коливання не проникають на всю товщину стінки огорожі, а поширюються по поверхні конструкції.

Якщо при падінні звукової хвилі на поверхню огорожі довжина вигинальної хвилі (λ_b) виявляється однакою довжини з падаючою звуковою хвилею (λ_b), то внаслідок такого збігу амплітуда коливання хвилі вигину значно зростає і спостерігається явище повної передачі звукової енергії по інший бік конструкції. Цей ефект зниження звукоізоляції конструкції має назву «ефекту хвильового збігу». При цьому падіння звукоізоляції відбувається різко і вже на початку діапазону. Тому, в розглядаємому діапазоні, зміна звукоізоляції не піддається точному розрахунку.

Зниження звукоізоляції, що спричинено хвильовим збігом, відбувається в певній для даної перешкоди області частот з початковим значенням так званої «критичної частоти конструкції» або частоти хвильового збігу ($f_{кр}$). Залежність для критичної частоти, яка визначає область зниженої звукоізоляції перешкоди, має вид:

$$f_{кр} = 2 \cdot 10^4 \sqrt{\rho/E} / h, \text{ Гц}, \quad (3)$$

де h — товщина конструкції, см; ρ — густина матеріалу, кг/м³; E — динамічний модуль пружності матеріалу огорожі, кг/см².

Провал у частотній характеристиці звукоізоляції конструкції може досягати величини 10 – 20 дБ і займає область приблизно на одну октаву вище ($f_{кр}$). На частоті звуку вище критичної істотне значення набуває жорсткість огорожі та внутрішнє тертя в матеріалі.

Практика експлуатації одношарових звукоізолюючих огорож показує, що конструкції виготовлені з таких будівельних матеріалів як звичайна або облицьована деревина, силікатне чи органічне скло, суха облицьовка, шлако-алебастрові плити, дають зниження рівня звуку до 40 дБ. Застосування будівельних матеріалів з високою поверхневою густиною (цегла в один шар товщиною 60 – 250 мм або в два шара, шлакобетонне каміння, залізобетон) дає зниження рівня звуку від 40 до 50 дБ. Але під-

вищення звукоізоляції шляхом збільшення маси перешкоди нерационально з точки зору конструктивних міркувань, навіть коли треба понизити рівень звуку на 50 дБ і вище.

Для зменшення маси огорожі та підвищення її звукоізолюючої здатності запропоновано застосувати двошарові огорожі. По конструкції — це простір між шарами будівельного матеріалу, який залишається повітряним проміжком або заповнюється звукоізоляційним матеріалом (рис. 2).

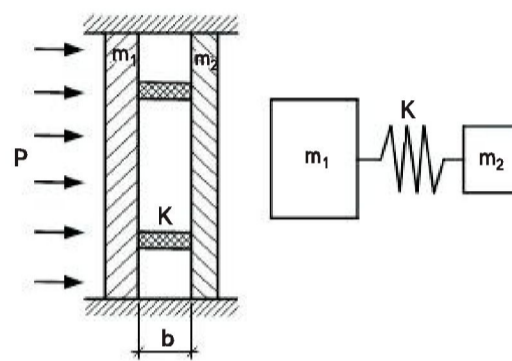


Рис. 2. Принцип звукоізоляції подвійними огорожами

Теорія передачі звуку через подвійну перегородку свідчить про те, що звукоізолююча здатність зростає із збільшенням маси обох стінок та ширини повітряного проміжку між ними. Ця теорія має «провал» у частотній характеристиці звукоізоляції на резонансній частоті огорожі (f_0) та підвищення звукоізоляції із зростанням звукової частоти (f) значно більше, ніж це виходить із «закона маси» для одинарних еквівалентних (однакова маса) огорож. Швидке зростання звукоізоляції при ($f > f_0$) пояснюється впливом суцільного повітряного проміжку між стінками.

Механізм передачі звуку через подвійну перегородку можна навести у такому вигляді. Звукові хвилі, що падають на одну із стінок перегородки, приводять її у стан вимушених коливань. Енергія цих коливань передається іншій стінці через повітряний прошарок, який поділяє стінки. Повітряний прошарок у подвійній огорожі утворює пружний зв'язок між стінками з динамічною жорсткістю (E_d) значно меншою за жорсткість будь-якого матеріалу. Тому при наявності повітряного проміжку звукопередача через подвійну конструкцію менше, ніж одинарну однакою поверхневою маси. Чим ширше прошарок, тим менше її акустична жорсткість та, відповідно, менше передача коливань від однієї стінки до іншої, тобто краща звукоізоляція конструкції.

Переваги подвійної перегородки перед еквівалентною одинарною в області частот ($f > f_0$) можна розширити за рахунок досягнення як можна меншої величини власної (резонансної) частоти її коливань.

Наближена формула власної частоти подвійної перегородки має вид:

$$f_0 = 120 / \sqrt{mb}, \text{ Гц} \quad (4)$$

де m — маса 1 м^2 обох стінок перегородки, кг; b — ширина повітряного проміжку, м.

Доцільним підбором маси і ширини повітряного проміжку між стінками можна одержати потрібне значення власної частоти.

Середню звукоізолюючу здатність подвійної огорожі з повітряним проміжком між стінками, можна наближено визначити з наступних емпіричних формул:

при масі обох стінок $(m_1 + m_2) \leq 200 \text{ кг/м}^2$

$$R = 13,5 \lg(m_1 + m_2) + 13 + \Delta, \text{ дБ} \quad (5)$$

при масі $(m_1 + m_2) > 200 \text{ кг/м}^2$

$$R = 23 \lg(m_1 + m_2) - 9 + \Delta, \text{ дБ} \quad (6)$$

де Δ — поправка в залежності від ширини повітряного проміжку між стінками огорожі, яка приймається по таким даним:

$b =$	3	4	5	6	7	8	9, см
$\Delta =$	2	3	4	5	6	6,5	7, дБ

Як видно з рис. 2, на звукоізоляційні якості подвійної огорожі впливає маса шару огорожі $(m_1 + m_2)$, жорсткість зв'язків (K) , товщина повітряного проміжку (b) . Теоретично звукоізоляція двошарової огорожі може складати 70 – 80 дБ, проте практична звукоізоляція не перевищує 60 дБ.

Той факт, що подвійні перегородки з повітряним проміжком між стінками мають меншу звукоізоляцію, ніж передбачається теорією можна пояснити впливом ефекту хвильового збігу; акустичною жорсткістю конструкції, яка залежить від маси стінок $(m_1 \text{ і } m_2)$, властивості матеріалу (внутрішнє тертя), жорсткості зв'язків (K) , товщини повітряного проміжку (b) та деяких інших менш вагомих факторів.

Ефект хвильового збігу позначається на подвійних перегородках у більшій ступені, ніж на одинарних. Загальна звукоізоляція подвійної перегородки погіршується, коли одна чи обидві стінки мають провали в частотній характеристиці при хвильовому збігу або обидві стінки мають провали збігу в одному і тому ж діапазоні частот. Тому доцільно приймати стінки неоднакової товщини або з різних матеріалів. Застосування у подвійних перегородках стінок, що мають співвідношення товщини (мас) — $(m_1/m_2 = 2)$ дозволяє покращити їх звукоізоляцію за рахунок зменшення негативного впливу ефекту хвильового збігу. Покращується також звукоізоляція конструкцій із стінками, які мають однакову масу, але неоднакову жорсткість.

Застосуванням будівельних матеріалів з певними властивостями можна збільшити звукоізоляцію огорожі за рахунок позитивного впливу внутрішнього тертя на швидкість затухання хвилі вигину конструкції та зниження амплітуди її резонансних коливань.

Зниження звукоізоляції подвійних перегородок, що зумовлене жорсткістю зв'язків стінок,

пояснюється наявністю жорстких «звукових містків» по поверхні стінок чи по їх контуру, які значно погіршують звукоізолюючі властивості конструкції. Перш за все, це стосується масивних перегородок та у меншому ступені — легких (гнучких).

Практика експлуатації подвійних огорож свідчить про те, що оптимальна ширина повітряного проміжку (b) повинна знаходитися в межах (40 – 60 мм).

Заповнення повітряного проміжку звукопоглинальним матеріалом підвищує звукоізоляцію легких подвійних огорож в області середніх та високих частот (вище 500 Гц). В області низьких частот (100 – 300 Гц) при невеликій ширині повітряного проміжку заповнення помітного покращання не дає, але зменшує низькочастотні резонансні провали для аналогічних важких подвійних огорож за рахунок їх гасіння. Передача звуку через таку перегородку здійснюється таким чином. Змінне звукове поле викликає коливання першого шару конструкції, які передаються пружному матеріалу проміжку між шарами. Внаслідок віброізолюючих властивостей заповнювача, коливання другого шару конструкції будуть значно ослаблені, а отже і шум, що збуджується коливаннями другого шару буде істотно знижений. Однак треба врахувати той факт, що із збільшенням жорсткості матеріалу, який заповнює проміжок між шарами, звукоізоляція подвійної огорожі падає.

Звукоізолююча здатність багатошарових легких огорож залежить від звукоізолюючих властивостей окремих шарів та від зв'язку їх між собою. Нарощування числа шарів незначно позначається на звукоізоляції яка, в основному, збільшується для області високих частот.

Істотне зростання звукоізоляції багатошарової конструкції починається з верхньої граничної частоти (f) , яка залежить від кількості шарів. Чисельне значення верхньої граничної частоти багатошарової конструкції:

$$f = f_0 \sqrt{2}, \text{ Гц}, \quad (7)$$

де f_0 — власна частота двошарової перегородки, що має однакову масу 1 м^2 поверхні з багатошаровою.

Оскільки для легких двошарових перегородок величина резонансної частоти $(f_0 \approx 100 - 300 \text{ Гц})$, то очікуване підвищення звукоізоляції у багатошарових перегородках з повітряними проміжками може проявлятися з частоти $(f_0 \approx 140 - 420 \text{ Гц})$.

Шарувата огорожувальна конструкція з перемінних шарів жорстких та пружних матеріалів, з точки зору звукоізоляції, краще ніж огорожа однакової маси з акустично однорідних матеріалів, але гірше ніж огорожа роз'єднаної конструкції. Крім того, передача повітряного шуму через шарувату конструкцію більше, через те що динамічна жорсткість шарів пружного матеріалу більше, ніж повітряного прошарку.

Висновки. З викладених теоретичних положень, наявних даних експериментальних і про-

мислових досліджень однорідних (одинарних), подвійних та багат шарових огорож можна зробити практичні рекомендації про доцільність використання саме подвійних огорож для боротьби з високими рівнями шуму на виробництві. Такі перешкоди дозволяють досягти достатньо високого ступеня звукоізоляції повітряного шуму (понад 50 дБ) без суттєвого збільшення їх маси.

Для ефективного використання технічних можливостей і переваг подвійних огорож, необхідно дотримуватись таких основних вимог при їх проектуванні: конструкція повинна бути легкою (гнучкою) з мінімальною жорсткістю зв'язків між її складовими елементами, виконана з матеріалів з великим внутрішнім тертям при дотриманні оптимального співвідношення товщин (мас) стінок 2/1 та

мати проміжок між стінками шириною 40 – 60 мм, що заповнюється повітрям або пружним звукопоглинальним матеріалом.

ЛІТЕРАТУРА

1. Пчелинцев В.А., Коптев Д.В., Орлов Г.Г. Охрана труда в строительстве: Учеб. для строит. вузов и фак. — М.: Высш. шк., 1991. — 272 с.
2. Релей Л. Теория звука. — М.: Гостехтеоретиздат, 1955. — 132 с.
3. Мякишин В.Н. Борьба с шумом и вибрацией на предприятиях пищевой промышленности. — К.: Техніка, 1985. — 142 с.
4. СНиП II – 12 – 77. Строительные нормы и правила. Часть II. Нормы проектирования. Защита от шума.

Одержана редколлегією 12.03.2010