ББК С 513-046,5-022.15 В 732

УДК 628.517.2:656.71.053.7(045)

**О.І. Запорожець, О.В. Коновалова**

# МЕТОДИ АКУСТИЧНОГО КОНСТРУЮВАННЯ ПРИМІЩЕНЬ

*Розглянуто моделювання звукового поля в середині приміщень від внутрішнього джерела та можливість використання карт шуму для опису шумової ситуації в службових приміщеннях і проектування нових виробничих приміщень будівель та споруд аеропорту.*

Для оцінки ефектів впливу шуму на робоче місце в зоні аеропорту або розпізнавання небезпечної експозиції шуму потрібне точне визначення емісії шуму для всіх робочих місць.

Звичайно емісія шуму на робочому місці описується еквівалентним рівнем звуку $L_{Aeq}$ протягом типового робочого дня, зведеного до 8 год. Якщо результуючий розрахунковий рівень шуму $L_{Aeq}$ перевищує деяку межу, тоді необхідно впроваджувати різні технічні й адміністративні заходи контролю.

Для опису шумової ситуації у виробничому приміщенні використовується карта шуму [1]. Вона може бути виконана за допомогою численних вимірювань емісії шуму (наприклад, у вузлах сітки, яка накладається на всю площину робочої кімнати) і комп'ютерного розрахунку, заснованого на значеннях емісії окремих джерел шуму і закономірностях розповсюдження звуку в приміщенні.

Карти шуму є інструментом для ідентифікації робочих місць з високою експозицією шуму, планування заходів і розробки довгострокової програми захисту від шуму.

Карти шуму можуть бути представлені як кольорові карти, де рівні звуку класифікуються і розрізнюються окремим кольором. Розробка такої карти шуму використовується для розв'язання таких задач:

– ідентифікації робочих місць з високою експозицією шуму;

– ідентифікації і обмеження окремих площ, де рівні емісії шуму перевищують відповідні межі (85/90 дБ (А));

– медичної експертизи слуху робітників і вибору персональних засобів захисту органів слуху;

– наочного представлення шумової ситуації, наприклад, як інформації для робітників;

– обгрунтування заходів і розробки довгострокової програми захисту від шуму.

Якщо карта шуму розрахована за допомогою комп'ютерної програми, виникають деякі додаткові прикладні задачі:

– ідентифікація домінуючих джерел шуму, але повинні бути відомі рівні звукової потужності всіх джерел;

– визначення карт шуму для різних виробничих режимів роботи джерел;

– прогнозування зниження шуму заходами боротьби з шумом окремих джерел (наприклад, огородження, захисні кожухи, екрани);

– прогнозування зниження шуму, яке досягається заходами акустичної обробки кімнати (наприклад, звукопоглинаючими стелями, стінами, екранами тощо);

– прогнозування ефекту від установки додаткових джерел або перестановки джерел у виробничому приміщенні,

– прогнозування експозиції шуму в нових виробничих приміщеннях та ідентифікації найбільш шумних зон;

– наочне представлення ефективності заходів боротьби з шумом.

Основні траєкторії розповсюдження звуку в приміщенні показані на рис. 1 [2].

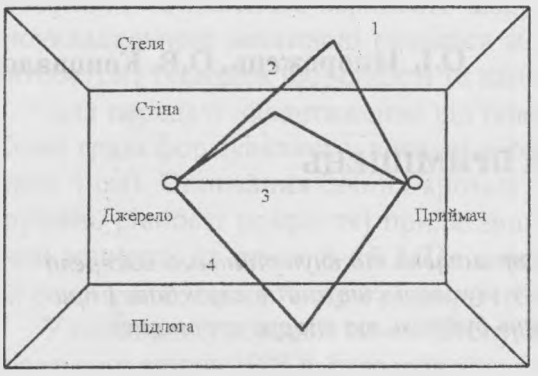


Рис. 1. Основні траєкторії розповсюдження звуку в кімнаті:
*1* – відбиття від підлоги; *2* – прямий промінь; *3* – відбиття від стіни або інших найближчих перешкод; *4* – відбиття від стелі

Для моделювання розповсюдження звуку у великих кімнатах використовуються два класичних геометричних методи: *метод трасування променів* і *метод вторинного джерела* [3].

Для обох методів проблемою є відображення в моделі довжини хвилі або частоти звуку. Це обумовлено тим, що звук має хвильову природу в той час, як звичайне моделювання засновується на існуванні променя.

Для моделювання розповсюдження звуку в приміщенні від внутрішнього джерела звуку необхідно врахувати такі ефекти:

– дзеркальне і дифузне відбиття;

– ранні та пізні відбиття;

– розсіювання звуку від поверхонь з шорсткою структурою;

– дифракцію завдяки кінцевим розмірам поверхонь;

– криві, опуклі і вгнуті поверхні;

– поглинання, що залежить від кута падіння звукової хвилі.

*Метод трасування променів* використовує велику кількість променів розповсюдження звуку в різних напрямах від точки розміщення джерела. Промені трасуються навкруги кімнати. Коли промінь ударяється об поверхню, він відбивається, і новий напрямок його розповсюдження визначається як звичайне дзеркальне відбиття. Як відомо з геометричної оптики, згідно із законом відбивання Снелла, кут відбиття дорівнює куту падіння.

*Метод вторинного джерела* заснований на принципі геометричної побудови дзеркального відображення джерела в площині поверхні відображення. Для прямокутної кімнати дуже просто конструювати всі уявні (вторинні) джерела до деякого порядку відбивання. Як правило, виробничі приміщення в аеропорту простої форми.

Розсіювання звуку від поверхонь може бути кількісно визначено коефіцієнтом розсіювання поверхні – відношенням між відбитою звуковою потужністю в недзеркальних напрямках і загальною відбитою звуковою потужністю:

$$\delta = \frac{P_{scat}}{P_{refl}} = \frac{P_{scan}}{(1-\alpha)P_{inc}}$$

де $P_{scat}$ – потужність розсіяного звуку; $P_{refl}$ – загальна потужність відбитого звуку; $\alpha$ – коефіцієнт поглинання поверхні; $P_{inc}$ – потужність падаючого звуку.

Коефіцієнт розсіювання може мати значення між 0 і 1, де $\alpha$=0 означає чисте дзеркальне відбиття і $\alpha$=1 означає, що вся потужність відбитого звуку розсіюється згідно з деяким законом «ідеального» розсіювання.

Недоліком класичних геометричних моделей є тривалий час обчислення при визначенні високих порядків відбивання для конфігурації кімнат, які мають складну, а не просту прямокутну форму. З цієї причини багато моделей є змішаними і використовують послідовні трасування можливих відбивань променів в кімнаті.

Ефективним методом для моделювання пізніх відбивань є *метод вторинного джерела*. Метод заснований на тому ж самому принципі трасування променів. На відміну від геометричних моделей при переході від ранніх до пізніх відбивань промені трактуються як передавачі енергії звуку.

Кожний раз, коли промінь ударяється об поверхню, в точці зіткнення генерується вторинне джерело (рис. 2). Енергія вторинного джерела є повною енергією первинного джерела,

розділена на кількість променів і помножена на коефіцієнт відбиття поверхонь, які залучені до траси променя від точки. Кожне вторинне джерело, що випускає промені в півкулю, розглядається як елементарне джерело. Таким чином, інтенсивність звуку є пропорційною косинусу кута між перпендикуляром до поверхні і вектором від вторинного джерела на приймач. Інтенсивність відбиття в приймачі зменшується згідно із зворотним квадратичним законом відносно до вторинного джерела. Час прибуття відбитого променя визначається сумою довжин шляху від первинного джерела до вторинного джерела через проміжні відбиваючі поверхні і відстанню від вторинного джерела до приймача.

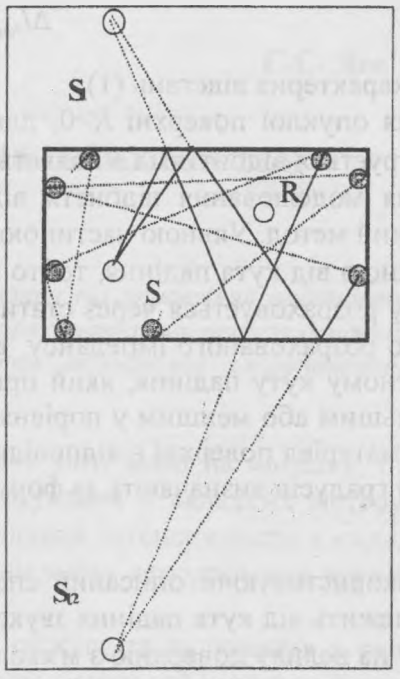

Рис. 2. Утворення відбивання звуку від точкового джерела та результуюча послідовність у приймачі

Враховуючи, що вірогідність видимості вторинного джерела від приймача зменшується з розміром поверхонь, що беруть участь в його створенні, і що в реальній ситуації відбиття від маленьких поверхонь звичайно набагато слабкіші, ніж ті, що розраховуються відповідно до законів геометричної акустики, можна прийняти кількість променів від 500 до 1000 за достатню для отримання достовірних результатів у звичайному приміщенні, а оптимальний порядок переходу від ранніх до пізніх відбивань – два або три. Це означає, що змішана модель може давати набагато кращі результати, ніж будь-який з основних методів, і за більш короткий час обчислення.

Розсіювання звуку від поверхонь з шорсткою структурою моделюється з використанням статистичних методів (використовуючи випадкові числа). Напрямок дифузного відбивання розраховується функцією вірогідності згідно з теоремою косинусів Ламберта. Напрямок дзеркального відбивання розраховується згідно із законом Снелла. Описаний коефіцієнт розсіювання потім використовується як ваговий коефіцієнт у процедурі усереднення координат двох спрямованих векторів, які відповідають розсіюванню або дзеркальному відбиванню відповідно.

Розміри відбивача повинні розглядатися відносно відстаней $a_1$ і $a_2$ до джерела і приймача відповідно. Так само використовується характерна відстань $a^*$, що визначається співвідношенням:

$$a^* = \frac{2a_1a_2}{a_1 + a_2}. \qquad (1)$$

Дифракція від прямокутної панелі з двома краями, перпендикулярними напрямку від джерела на приймач, може бути описана:

$$\Delta L_{diffr} = 10\log(K_1K_2), \qquad (2)$$

де $K_1$ і $K_2$ – коефіцієнти відбиття для безмежних смуг, відповідних двом поперечним перетинам поверхні відбиття

Поперечний перетин містить точки джерела і приймача. Коефіцієнт $K_1$ є функцією проекції ширини панелі $2b \cos \alpha$, коефіцієнт $K_2$ – аналогічною функцією довжини панелі в перпендикулярному напрямку.

Якщо розглядати відбиття від циліндра з радіусом кривизни $R$ з точки зору геометрії, то можна отримати приблизний вираз

$$\Delta L_{curv} = -10 \log \left| 1 + \frac{a^*}{R \cos\theta} \right|,$$

де $a^*$ – характерна відстань (1).

Для опуклої поверхні $R>0$, для вгнутої поверхні $R<0$. В останньому випадку енергія концентрується відбиттям і з'являється фокусуючий ефект, коли $R= -a^*/\cos\alpha$.

Для моделювання відбиття від поверхонь з різним коефіцієнтом поглинання існує спрощений метод. Уявною частиною повного опору нехтують, а дійсна частина приймається незалежною від кута падіння, тобто поверхня є локально реагуючою. Дійсна частина повного опору розраховується через статистичний коефіцієнт поглинання, що вимірюється за допомогою розрахованого імпедансу, відповідного контрольній поверхні довжиною 11 м і еквівалентному куту падіння, який приблизно дорівнює 60 градусів. Імпеданс поверхні може бути більшим або меншим у порівнянні з характеристикою імпедансу для повітря, що означає, що матеріал поверхні є відповідно твердим або м'яким. Коефіцієнт відбиття для кута падіння 60 градусів визначають за формулою

---

Використовуючи описаний спрощений метод, можна визначити коефіцієнт відбиття, який залежить від кута падіння звукової хвилі. Коефіцієнт має негативний знак у разі падіння звуку на велику поверхню з м'якого матеріалу.

Таким чином, карти шуму дають достовірну інформацію відносно розподілу рівнів звуку в робочій кімнаті і можуть використовуватися для опису шумової ситуації в існуючих кімнатах і проектування нових виробничих приміщень. За допомогою карт можуть бути ідентифіковані зони можливої небезпечної експозиції шуму і визначені необхідні заходи адміністративного і технічного контролю.

Для моделювання звукового поля в середині приміщення від внутрішнього джерела необхідно враховувати по можливості всі описані ефекти звукових відбивань. Для цієї мети використовуються як класичні геометричні моделі, так і змішані методи.

## Список літератури

1. *Maue J.* Prediction of Noise Immission Using a Room Acoustic Calculation Model // Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitssicherheit. – Germany. – 1998. – 6 p.

2. *Jonasson H.G.* Acoustical Rating and Classification of Office Screens // Nordtest, Project report 809-89. – Swedish National Testing and Research Institute. Physics and Electronics. – 1991. –28 p.

3. *Rindel J.H.* Computer simulations techniques for the acoustical design of rooms - how to treat reflections in sound field simulation // ASVA-97. – Tokyo, 1997. – P. 201-208.

Стаття надійшла до редакції 28.02. 01.