

УДК 504.055(045)

¹Ю.С. Шевченко, асп.
²О.М. Береговий, с.н.с.
³В.Г. Парашанов, н.с.

МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ ФАСАДУ БУДІВЛІ НА ФОРМУВАННЯ ЗВУКОВОГО ПОЛЯ

Національний авіаційний університет

¹E-mail: shevchenko24.12@gmail.com

²E-mail: vibraciy@ukr.net

³E-mail: simultan@ukr.net

Досліджено методи моделювання звукових полів. Розроблено дві променеві моделі розрахунку впливу фасаду будівлі на формування звукового поля: класичну променеву модель та модель, що враховує функцію автокореляції. Проведено моделювання звукових полів перед фасадом будівлі методом скінченних елементів. Проаналізовано доцільність використання кожної моделі та точність отриманих результатів.

Ключові слова: інтерференція, метод скінченних елементів, променева модель, фасад.

Постановка проблеми

При оцінюванні рівнів шуму в міському середовищі важливим етапом є оцінювання впливу фасадів будівель на формування звукового поля шляхом моделювання чи експериментальних досліджень.

При оцінюванні впливу відбиваючих поверхонь, таких, як фасади будівель та поверхня землі, припускається, що дані поверхні є напівнескінченними відбивачами.

Отже, звукове поле визначається суперпозицією прямого променя від джерела шуму до приймача та відбитими променями, що є дзеркальним відбиттям променів від фасаду будівлі та/або від землі.

Основними ефектами, що розглядаються, є ефекти інтерференції звукових хвиль.

Під час формування звукового поля на вулицях міста фасади будівель приймаються як відбивачі, що підвищують рівень звукового тиску (РЗТ) за рахунок додаткових відбиттів звукових променів від них.

Мета роботи – створення та дослідження моделей відбивання звуку від різних імпедансних поверхонь, а також верифікація результатів зіставленням з експериментальними даними та результатами числового розрахунку за допомогою методу скінченних елементів (МСЕ).

Аналіз досліджень і публікацій

У роботі Хотерзола та Сімсона [1] розроблено модель поправки для розрахунку впливу фасаду на положення приймача біля поверхні фасаду.

Для моделювання шуму транспорту використовувалося лінійне джерело шуму та припускалося, що фасад функціонує як достатньо великий відбивач, тому слід розглядати лише геометричні відбиття.

Польові дослідження Холла [2] шуму транспорту показали, що для положень мікрофону на відстані 2 м від фасаду припущення подвоєння акустичної енергії через наявність фасаду є актуальним лише для частот вище ніж 200 Гц.

Результати експериментальних досліджень, проведених Квіртом [3], для положень мікрофону на площині реального фасаду та на відстані 2 м від фасаду продемонстрували, що ефекти дифракції були незначними для точок вимірювання біля кутів фасаду будівлі, а основні зміни РЗТ визначалися ефектами інтерференції на поверхні землі.

У роботі Хопкінса [4] запропоновано використовувати функцію автокореляції для дослідження широкосмугових сигналів шуму, яким є шум автомобільного транспорту.

Формулювання граничної задачі для методу скінченних елементів

Розрахунки проводилися для лінійних гармонічних звукових коливань в пружному середовищі Ω , що описуються рівнянням Гельмгольца.

Граничні умови задавалися імпедансними граничними умовами.

Гармонічна залежність звукового тиску приймалася як

$$\hat{p}(\vec{x}, t) = \Re\{p(\vec{x})e^{-i\omega t}\}.$$

Таким чином, граничну задачу в R^d (для $d = 1,2,3$) можна сформулювати для гармонічних коливань звукового тиску p у вигляді таких формул:

– рівняння Гельмгольца:

$$\Delta p(\vec{x}) + k^2 p(\vec{x}) = 0; \tag{1}$$

$$\vec{x} \in \Omega \subset \mathfrak{R}^2,$$

– граничні умови:

$$v_f(\vec{x}) - v_s(\vec{x}) = Y(\vec{x}) p(\vec{x}); \tag{2}$$

$$\vec{x} \in \Gamma$$

де $k = \omega/c$ – хвильове число;

$\omega = 2\pi f$ – циклічна кутова частота;

f – частота звукових коливань;

c – швидкість звуку;

Y – граничний адмітанс;

v_s – нормальна швидкість часток оточуючої структури.

Нормальна швидкість часток середовища v_f відноситься до нормальної похідної звукового тиску:

$$v_f(\vec{x}) = \frac{1}{i\omega\rho_0} \frac{\partial p(\vec{x})}{\partial n_x} = \frac{1}{sk} \frac{\partial p(\vec{x})}{\partial n_x},$$

де i – уявна одиниця ($i^2 = -1$),

ρ_0 – середня густина середовища.

Вектор $\vec{n}(\vec{x})$ являє собою зовнішню нормаль до точки поверхні \vec{x} , а $\partial/\partial n_x$ – нормальну похідну в точці \vec{x} .

Змінна s визначається як

$$s = i\rho c.$$

Для виконання рівняння Гельмгольца (1) та граничних умов (2) розв’язування зовнішніх

задач вимагає накладання умов затухання на нескінченності – умов Зомерфельда:

$$p = O(r^{-1/2}); \tag{3}$$

$$\frac{\partial p}{\partial r} - ikp = o(r^{-1/2}), \tag{4}$$

де r – відстань між довільною точкою пружного середовища та джерелом звуку.

Умови Зомерфельда є умовами затухання лише для $d > 1$.

Моделювання методом скінченних елементів

Розрахунки МСЕ для розв’язання хвильового рівняння проводилися в програмному пакеті Comsol Multiphysics для двовимірної задачі ($d = 2$) в площині $z = 0$.

Поверхні фасаду та землі задавалися як імпедансні поверхні двох типів:

– з характеристиками опору продуванню повітрям, що відповідає абсолютно жорстким поверхням;

– імпедансі поверхні, коефіцієнт відбиття для яких менше 1.

Для моделювання умов Зомерфельда на нескінченності застосовувалися умови циліндричного ідеально поглинаючого шару (Perfectly Matched Layer), що відповідає умовам вільного поля (рис. 1).

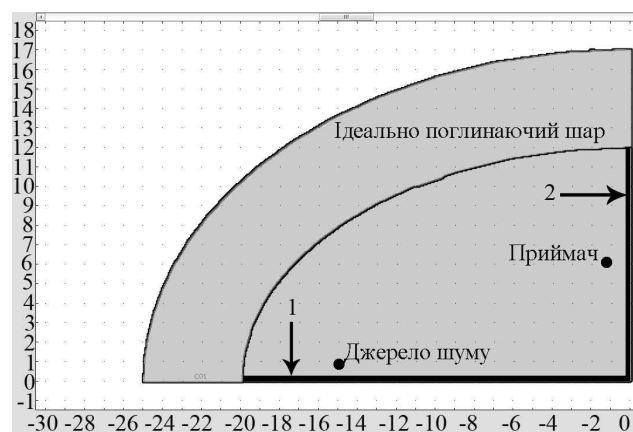


Рис. 1. Геометрія взаємного розташування джерела шуму, приймача та фасаду будівлі в програмному пакеті Comsol Multiphysics:
1 – поверхня землі;
2 – поверхня фасаду будівлі

Геометричні розміри ідеально поглинаючого шару визначаються з умови, що на ньому повинна вкладатися мінімум одна хвиля.

Висота фасаду будівлі становила 12 м при висоті джерела шуму 0,85 м та положенні мікрофону 6,1 м над поверхнею землі. Припускалося, що будь-які вклади від дифракції на верхній кромці фасаду будівлі були достатньо малими. Основними ефектами, що визначають формування звукового поля, вважалися ефекти інтерференції.

При використанні МСЕ було обрано чотири елементи на довжину хвилі для забезпечення точності розрахунків.

Для чотирьох елементів на довжину хвилі абсолютна похибка при розрахунках МСЕ становила 1,5 %.

Для моделювання сітки використовувалися квадратичні елементи Лагранжа. Розмір елементів для поточних розрахунків МСЕ для чотирьох елементів на довжину хвилі для різних частот наведено в таблиці.

При розв'язанні систем лінійних рівнянь МСЕ використовували такі розв'язувачі прямим методом:

Розмір елементів при розрахунках МСЕ

Частота, Гц	Довжина хвилі, м	Максимальний розмір елементів, м
50	6,80	1,700
63	5,40	1,349
80	4,25	1,063
100	3,40	0,850
125	2,72	0,680
160	2,13	0,531
200	1,70	0,425
250	1,36	0,340
315	1,08	0,270
400	0,85	0,213
500	0,68	0,170
630	0,54	0,135
800	0,43	0,106
1000	0,34	0,085

UMFPACK – несиметричний мультифронтальний метод та пряме розкладання розріджених матриць;

SPOOLES – об'єктно-орієнтована бібліотека програмного забезпечення для розв'язання розріджених систем лінійних рівнянь;

PARDISO – паралельний прямий розв'язувач для розріджених матриць.

Зміна РЗТ визначалася як різниця РЗТ за наявності та відсутності фасаду будівлі. Результати моделювання звукових полів МСЕ показано на рис. 2 для частот 63 та 125 Гц.

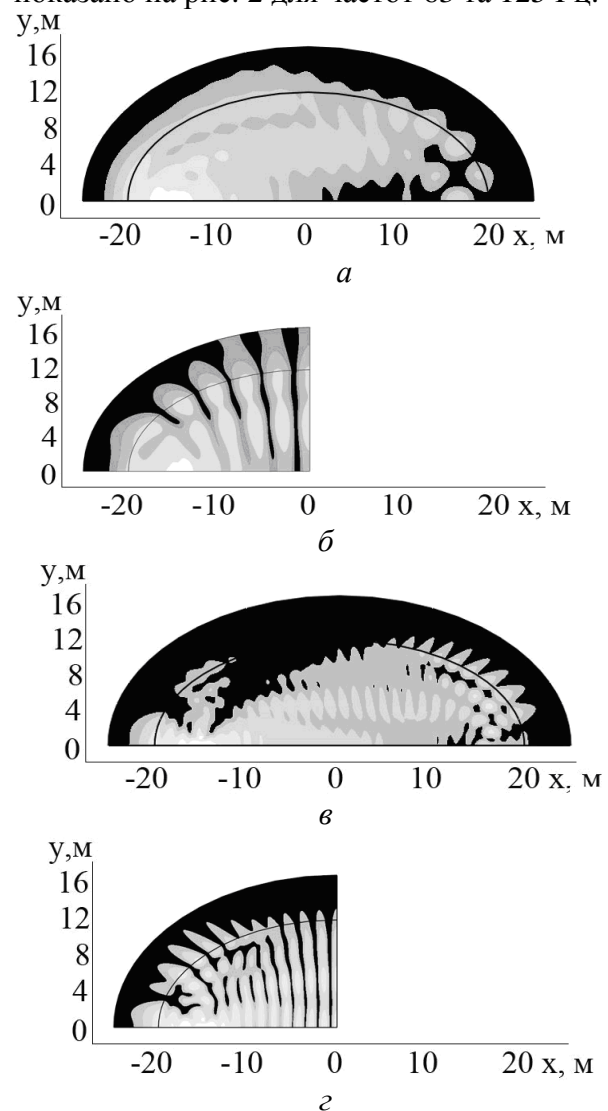


Рис. 2. Результати моделювання звукових полів:
 а – для частоти 63 Гц без фасаду;
 б – для частоти 63 Гц перед фасадом;
 в – для частоти 125 Гц без фасаду;
 з – для частоти 125 Гц перед фасадом

Променеві моделі

При дослідженні впливу напівнескінченного відбивача на зміну РЗТ було розглянуто дві моделі, в основі яких лежить розрахунок методом уявних джерел: класичну променеву модель та удосконалену модель Хопкінса [5], що враховує функцію автокореляції.

Променеві моделі базуються на основних принципах геометричної акустики та враховують багаторазові відбиття від поверхні землі та поверхні фасаду будівлі. У моделях використовується принцип методу уявних джерел.

Обидві поверхні розглядаються як імпедансні. Припускається, що поверхня землі та поверхня фасаду будівлі напівнескінченні відбивачі.

Характеристики імпедансних поверхонь ураховуються внесенням у моделі коефіцієнта відбиття для сферичних звукових хвиль [6].

Основною характеристикою імпедансної поверхні є опір продуванню поверхні.

Розрахунки проводилися для точкового джерела шуму, що випромінює сферичні хвилі.

Оскільки основними ефектами, що вносять зміни у РЗТ перед фасадом є ефекти інтерференції, необхідно, щоб при моделюванні розміри фасаду були значно більшими від довжин хвиль.

Таким чином, зміна РЗТ за наявності фасаду визначається:

– для класичної променевої моделі:

$$\Delta L_{\phi} = 10 \lg \left| \frac{P_{\text{сум}}}{P_1 + P_2} \right|;$$

$$P_1 + P_2 = \frac{\exp(ikd_1)}{4\pi d_1} + Q_g \frac{\exp(ikd_2)}{4\pi d_2};$$

$$P_{\text{сум}} = \frac{\exp(ikd_1)}{4\pi d_1} + Q_g \frac{\exp(ikd_2)}{4\pi d_2} +$$

$$+ Q_f \frac{\exp(ikd_3)}{4\pi d_3} + Q_g Q_f \frac{\exp(ikd_4)}{4\pi d_4};$$

– для удосконаленої моделі Хопкінса [5]:

$$\Delta L_{\phi} = 10 \lg \left| \frac{\langle P^2 \rangle_{\text{сум}}}{\langle (P_1 + P_2)^2 \rangle} \right|;$$

$$\langle (P_1 + P_2)^2 \rangle = 1 + \left(Q_g \frac{d_1}{d_2} \right)^2 + Q_g \frac{2d_1}{d_2} R(\Delta d_{12});$$

$$\langle P^2 \rangle_{\text{сум}} = 1 + \left(Q_g \frac{d_1}{d_2} \right)^2 + \left(Q_f \frac{d_1}{d_3} \right)^2 +$$

$$+ \left(Q_g Q_f \frac{d_1}{d_4} \right)^2 + Q_g \frac{2d_1}{d_2} R(\Delta d_{12}) +$$

$$+ Q_f \frac{2d_1}{d_3} R(\Delta d_{13}) + Q_g Q_f \frac{2d_1}{d_4} R(\Delta d_{14}) +$$

$$+ Q_g Q_f \frac{2d_1^2}{d_2 d_3} R(\Delta d_{23}) + Q_g^2 Q_f \frac{2d_1^2}{d_2 d_4} R(\Delta d_{24}) +$$

$$+ Q_g Q_f^2 \frac{2d_1^2}{d_3 d_4} R(\Delta d_{34}),$$

де Q_g та Q_f – коефіцієнти відбиття сферичної хвилі від землі та фасаду будівлі відповідно;

d_k – відстані, що проходять звукові промені;

$R(\Delta d_{mn})$ – функція автокореляції для двох променів [4].

Аналіз результатів дослідження

Порівняння результатів розрахунків за допомогою методу уявних джерел для променевих моделей та розв'язку хвильового рівняння Гельмгольца МСЕ, а також зіставлення теоретичних результатів розрахунків з експериментально отриманими даними показано на рис. 3–4.

Із рис. 3 видно, що для абсолютно жорстких поверхонь фасаду будівлі та землі для діапазону частот 50–250 Гц удосконалена модель зі внесенням функції автокореляції дає більшу відповідність експериментальним результатам та розрахунку МСЕ.

Класична променева модель дає не достатньо точні результати як для абсолютно жорстких, так і для імпедансних поверхонь.

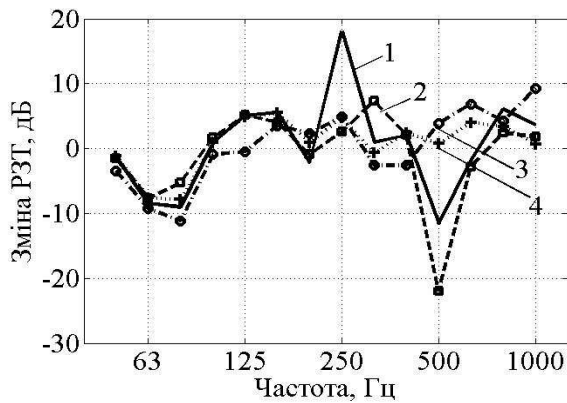


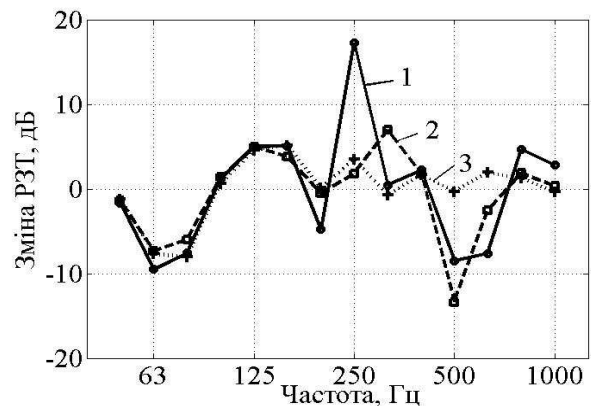
Рис. 3. Зміна РЗТ перед фасадом будівлі для абсолютно жорстких поверхонь фасаду та поверхні землі:

1 – класична променева модель методом уявних джерел;
2 – МСЕ;
3 – експериментальні вимірювання;
4 – променева модель з функцією автокореляції для широкопasmових сигналів

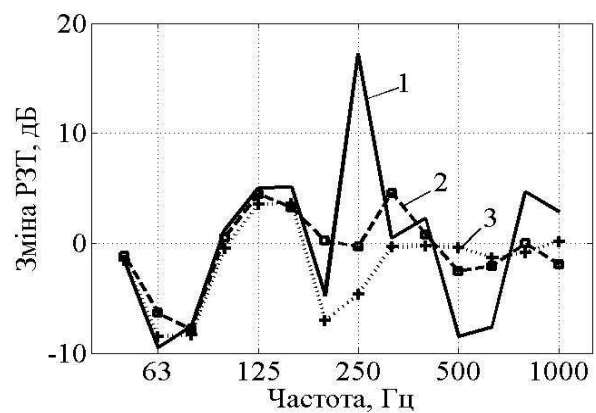
Аналіз результатів, отриманих для різних імпедансних поверхонь (рис. 4), показав, що при зменшенні опору продуванню повітрям, що характеризує поверхні з коефіцієнтом відбиття менше одиниці, для м'яких імпедансних поверхонь (рис. 4, б, в) розроблені моделі дають якісну відповідність лише в діапазоні 50–160 Гц і тому потребують подальшого доопрацювання.

Однією з характеристик використовуваних променевих моделей є те, що вони враховують лише перші відбиття від поверхонь, оскільки вважалось, що подальші відбиття не будуть створювати значного впливу на формування звукового поля. Тому відмінності можуть пояснюватися вкладом подальших відбиттів. Ще одним поясненням неточності у вимірюваннях та розрахунках є те, що на високих частотах завдяки турбулентному повітрю знижується когерентність хвиль, що розповсюджуються, тому розрахунки не можуть відображати реальних значень без урахування додаткових метеорологічних умов.

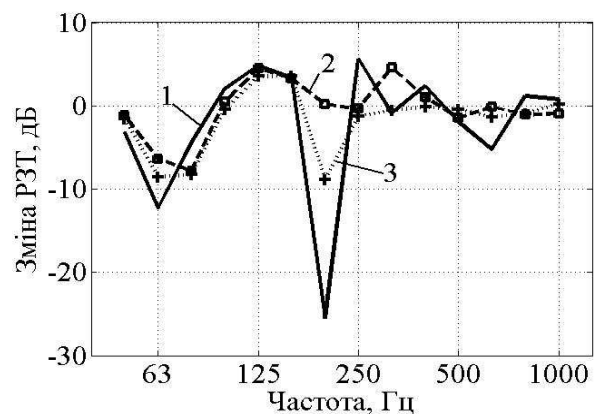
Для розрахунку звукових полів методом уявних джерел використовувався програмний код MatLab.



а



б



в

Рис. 4. Зміна РЗТ перед фасадом будівлі різними методами для різних імпедансних поверхонь:

а – опір продуванню поверхні землі 20 000 та 630 kNc/m^4 для поверхні фасаду;

б – опір продуванню поверхні землі 20 000 та 100 kNc/m^4 для поверхні фасаду;

в – опір продуванню поверхні землі 630 та 100 kNc/m^4 для поверхні фасаду;

1 – класична променева модель методом уявних джерел;

2 – МСЕ;

3 – променева модель із функцією автокореляції для широкопasmових сигналів

Зміна РЗТ залежить від геометричних конфігурацій міського ландшафту, фасадів, положення джерела шуму та приймача.

Розрахунки МСЕ вимагають більших ресурсів особливо на високих частотах порівняно з методом уявних джерел.

Висновки

Дослідження двох променевих моделей та їх верифікація МСЕ й експериментально показали, що необхідна точність результатів досягається лише для низьких частот, а саме для досліджуваного 1/3-октавного діапазону частот 50–250 Гц. Розрахунки числовими методами, як правило, проводять для такого діапазону частот.

Основною характерною відмінністю класичної променевої моделі та удосконаленої моделі Хопкінса є те, що перша точно відображає піки та провали в результаті деструктивної або конструктивної інтерференції звукових хвиль. Остання враховує характеристики транспортного потоку як широкополосного джерела шуму. Тому піки та провали згладжені порівняно з результатами, отриманими за допомогою класичної моделі.

Основними перевагами розрахунку МСЕ можна вважати більшу точність та детальність отриманих результатів. Розрахунки числовими методами приймаються як зразкові моделі для верифікації експериментальних даних та простіших інженерних моделей. Недоліками МСЕ є значний час, необхідний для розрахунків.

Основною перевагою променевих моделей є незалежність часу розрахунку від досліджуваної частоти та швидкість обчислення. Тому для високих частот більш доцільно застосовувати променеві моделі.

Література

1. *Hothersall, D.C.; Simpson, S.* 1983. The reflection of road traffic noise. – *Journal of Sound and Vibration*. Vol. 90(3): P. 399–405.
2. *Hall, F.L.; Papakyriakou, M.J.; Qwert, J.D.* 1984. Comparison of outdoor microphone locations for measuring sound insulation of building facades. – *Journal of Sound and Vibration*. Vol. 92(4): P. 559–567.
3. *Qwert, J.D.* 1985. Sound fields near exterior building surfaces. – *Journal of Acoustic Society of America*. Vol. 77(2): P. 557–566.
4. *Hopkins, C.; Lam, Y.* 2009. Sound fields near building facades – comparison of finite and semi-infinite reflectors on a rigid ground plane. – *Applied Acoustics*. Vol. 70: P. 300–308.
5. *Шевченко Ю.С.* Аналіз формул розрахунку ефективності акустичних екранів на вулицях / Ю.С. Шевченко // *Вісник НАУ*. – 2010. – № 4(45). – С. 94–99.
6. *Chien, C. F.* 1980. A note on the calculation of sound propagation along an impedance surface. – *Journal of Sound and Vibration*. 69(2): P. 340–343.

Стаття надійшла до редакції 08.07.2011.