

УДК 504.055(045)

Ю.С. Шевченко, асп.

АНАЛІЗ ФОРМУЛ РОЗРАХУНКУ ЕФЕКТИВНОСТІ АКУСТИЧНИХ ЕКРАНІВ НА ВУЛИЦЯХ

Національний авіаційний університет
E-mail: shevchenko24.12@gmail.com

Проведено аналіз основних формул розрахунку ефекту дифракції на кромці акустичного екрана та ефекту інтерференції звукових хвиль у разі відбивання від імпедансних поверхонь. Розглянуто критерії оцінювання ефективності акустичних екранів. Проаналізовано модель оцінювання впливу фасаду будівлі на формування звукового поля на вулиці.

Analysis of principal formulae for calculation of diffraction effects on the top edge of noise barrier and interference effects of sound waves after reflection from impedance surfaces was done. Main criteria of noise barriers efficiency assessment were considered. Model for calculation of building façade impact was analyzed. Assessment of building façade impact on sound field formation on the street was done.

Выполнен анализ основных формул расчета эффекта дифракции на кромке акустического экрана и эффекта интерференции звуковых волн при отражении от импедансных поверхностей. Рассмотрены критерии оценки эффективности акустических экранов. Проанализирована модель оценивания влияния фасада здания на формирование звукового поля на улице.

Постановка проблеми

Зниження шуму в містах є однією з найважливіших проблем. Методи зниження шуму можуть бути поділені на три основні групи:

- зниження шуму в джерелі;
- зниження шуму на шляху його поширення;
- зниження шуму в точці прийому.

Методи боротьби з шумом у джерелі та в точці приймання не завжди доступні для впровадження. Саме тому методи зниження шуму на шляху його поширення є основними.

Найпопулярнішим засобом охорони навколишнього середовища від надлишкового шуму є встановлення акустичних екранів у зоні міської забудови й у сільській місцевості.

Основним принципом роботи акустичних екранів є перетин лінії візування від джерела шуму до приймача і таким чином екранування приймача від шуму.

Мета роботи – дослідження формул оцінки ефективності акустичних екранів, аналіз існуючих ефектів дифракції на кромці тонкого акустичного екрану та інтерференції звукових хвиль, а також аналіз впливу фасаду будівлі на формування звукового поля на вулиці.

Аналіз досліджень

Різні види екранів, що інтенсивно використовують сьогодні, мають різноманітні форми:

- прямі екрани;
- зігнуті зверху екрани;
- нахилені екрани;
- решітчасті екрани;
- екрани з кількома кромками.

Для оптимізації акустичної ефективності екранів необхідно мати точні методики оцінювання.

Теоретичні та експериментальні дослідження дифракції звуку на кромці тонкого екрану були і є об'єктом дослідження вже більше двох століть. Багато теоретичних результатів дослідження дифракції сферичної звукової хвилі на півплощині чи на клині підтверджено експериментальними результатами.

Аналітичні формули

Для пошуку рішення для звукового поля від монопольного джерела звуку поблизу напівнескінченної поверхні часову залежність беремо $e^{-i\omega t}$ та упускаємо для спрощення.

Акустичне поле в зоні екрану залежить від взаємного положення джерела шуму, приймача й екрану. Сумарний акустичний тиск у кожній із трьох зон дорівнює:

– перед екраном

$$p_c = p_i + p_r + p_d;$$

– над екраном

$$p_c = p_i + p_d;$$

– в зоні акустичної тіні

$$p_c = p_d,$$

де p_i – акустичний тиск падаючої хвилі,

p_r – акустичний тиск відбитої хвилі,

p_d – акустичний тиск дифракційної хвилі.

Для розрахунку тиску дифракційної хвилі однією з найуживаніших формул є формула Пірса:

$$p_d(S, R, D) = \left(\frac{e^{i\pi/4}}{\sqrt{2}} \right) \left[\frac{e^{ik(d_s+d_r)}}{4\pi(d_s+d_r)} \right] \times [A_D(X_+) + A_D(X_-)],$$

де $A_D(X)$ – дифракційний інтеграл:

$$A_D(X) = \text{sgn}(X) [f(|X|) - ig(|X|)],$$

$\text{sgn}(X)$ – знакова функція;

$f(X)$ та $g(X)$ – допоміжні функції Френеля дійсного аргументу X .

Аргументи функцій Френеля визначаються за такими формулами:

$$X_{\pm} = X(\phi_R \pm \phi_S),$$

$$X(\Phi) = \left[-2 \cos\left(\frac{\Phi}{2}\right) \right] \sqrt{\frac{2d_s d_r}{\lambda(d_s + d_r)}}, \quad (1)$$

де λ – довжина хвилі;

ϕ_S та ϕ_R – кути, визначені в площині екрану (рис. 1).

Аргумент Φ у формулі (1) становить $(\phi_R + \phi_S)$ та $(\phi_R - \phi_S)$ відповідно для X_+ та X_- .

Наближені рішення

для тонкого акустичного екрану

Для розрахунку ефекту дифракції на півплощині, що включають фізичну інтерпретацію дифракції, запропоновану Юнгом та Френелем, існує ряд наближених аналітичних розв’язків. Найпоширенішим є наближення Френеля–Кіргофа, яке є математичною інтерпретацією принципу Гюйгенса–Френеля, що широко використовується в оптиці [1].

Ще один наближений аналітичний розв’язок можна чисельно оцінювати за допомогою стандартного методу Лагера [2].

Тиск у дифракційній хвилі розраховується за такою формулою:

$$U(\phi_i, d_s, d_r) = -\frac{1}{\pi} A(\phi_i) \left(\frac{e^{ikD}}{D} \right) \times$$

$$\times \int_0^\infty e^{-\zeta} G(\zeta, \phi_i, d_s, d_r);$$

$$D = d_s + d_r;$$

$$\phi_i = \begin{cases} |\phi_R - \phi_S|, & \text{якщо } i = 1, \\ 2\pi - \phi_S - \phi_R, & \text{якщо } i = 2, \\ \phi_R + \phi_S, & \text{якщо } i = 3, \\ 2\pi - |\phi_R - \phi_S|, & \text{якщо } i = 4; \end{cases}$$

$$A(\phi_i) = \begin{cases} (\pi - \phi_i) / 4, & \text{якщо } \pi \geq \phi_i, \\ -(3\pi + \phi_i) / 4, & \text{якщо } \pi < \phi_i, \end{cases}$$

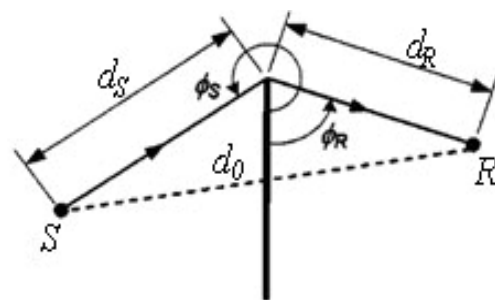


Рис. 1. Геометрична конфігурація для дифракції звуку на тонкому екрані:

S – джерело шуму;

R – приймач шуму;

d_s – відстань від джерела до кромки екрану;

d_r – відстань від кромки екрану до приймача;

d_0 – відстань від джерела шуму до приймача за відсутності екрану;

ϕ_S, ϕ_R – кути дифракції

$$G(\zeta, \phi_i, d_s, d_r) = \frac{1}{A(\phi_i)} \left(1 + \frac{i}{kD + i\zeta} \right) \times \\ \times \left(\frac{kD}{kD + i\zeta} \right) \tan^{-1} [\tan[A(\phi_i)]] \times \\ \times \tanh \left\{ \sinh^{-1} \left[\frac{\zeta D \left(\frac{i}{2} - \frac{\zeta}{4kD} \right)}{kd_s d_r} \right] \right\},$$

де ζ – допоміжна змінна інтегрування;
 d_s та d_r показано на рис.1.

Емпіричні формули

Найпростішим методом оцінювання ефективності акустичних екранів є проведення повномасштабних натурних експериментів. Проте ефективність екранів можна визначити експериментально на масштабних моделях в акустичних камерах.

Перші криві зниження шуму екранами в зоні акустичної тіні отримано Редферном у 1940-х рр. Через 30 років Маєкава визначив зниження шуму тонким жорстким екраном для різних положень джерела шуму та приймача. Він подав експериментальні дані у вигляді кривої, що зображувала зниження шуму залежно від одного параметра, відомого як число Френеля. Число Френеля – це число відношення різниці ходу променів (різниця відстані, що проходить прямий промінь, та відстані, що проходить промінь через кромку екрана в результаті ефекту дифракції) до половини довжини хвилі.

На основі досліджень Маєкави та Редферна Курц та Андерсон вивели емпіричну формулу для розрахунку зниження шуму тонким акустичним екраном.

Зниження шуму виражається функцією відносних положень джерела шуму та приймача, включаючи кути дифракції з боку джерела та приймача. Завдяки їх простоті криву Маєкави та формулу Курца–Андерсона застосовують в інженерній практиці.

Простою функцією, що відповідає кривій Маєкави, є:

$$\Delta L = 10 \log(3 + 20N_1), \quad (2)$$

де N_1 – число Френеля.

Формула (2) була визначена для $N_1 > 0$, але досить часто використовується для $N < -0,05$.

Більш точні формули були запропоновані Ямамото та Такагі [1].

На додаток до формул Ямамото та Такагі Курц та Андерсон запропонували нову просту формулу, що набула широкого застосування.

Крива Маєкави може бути математично виражена у такому вигляді:

$$\Delta L = 5 + 20 \log \frac{\sqrt{2\pi N_1}}{\tanh \sqrt{2\pi N_1}} \quad \text{для } N_1 > 0.$$

Крива Маєкави та її емпіричні формули визначають лише амплітуду зниження рівня звуку, проте не враховують ефекти інтерференції звукових хвиль.

Покращена формула для розрахунку зниження шуму акустичним екраном розробила Менуну на основі кривої Маєкави з модифікацією кривої з одним числом Френеля на сім'ю кривих із двома числами Френеля.

Перше число Френеля N_1 характеризує відносне положення джерела шуму та приймача відносно до акустичного екрана.

Друге число Френеля N_2 характеризує відносне положення уявного джерела відносно до екрана та приймача (рис. 2).

Таким чином, зниження шуму екраном визначається:

$$\Delta L_{\text{екр}} = \Delta L_s + \Delta L_b + \Delta L_{sb} + \Delta L_{sp} = \Delta L_c + \Delta L_{sp},$$

де

$$\Delta L_s = 20 \lg \frac{\sqrt{2\pi N_1}}{\text{th}(\sqrt{2\pi N_1})} - 1;$$

$$\Delta L_b = 20 \lg \left[1 + \text{th} \left(0,61 \lg \frac{N_2}{N_1} \right) \right];$$

$$\Delta L_{sb} = \left(6 \text{th}(\sqrt{N_2}) - 2 - \Delta L_b \right) \left(1 - \text{th}(\sqrt{10N_1}) \right);$$

$$N_1 = \frac{D - d_0}{\lambda/2};$$

$$N_2 = \frac{D - d_{00}}{\lambda/2};$$

$$D = d_s + d_R;$$

$$\Delta L_c = \Delta L_s + \Delta L_b + \Delta L_{sb},$$

де d_s , d_R , d_0 , d_{00} показано на рис. 2.

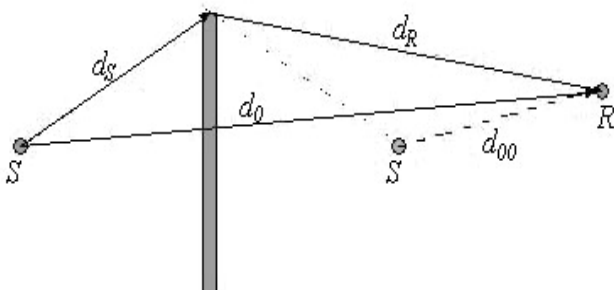


Рис. 2. Схема дифракції акустичних хвиль на тонкому екрані:

d_0 – відстань між джерелом і приймачем звуку (коли екрана немає);

d_{00} – відстань між приймачем звуку і уявним джерелом (уявне джерело розміщена симетрично відносно екрана в зоні акустичної тіні);

d_s – відстань між джерелом шуму і верхньою кромкою екрана;

d_R – відстань між верхньою кромкою екрана і приймачем шуму

Зниження шуму для сферичних хвиль визначають за формулою:

$$\Delta L_{sp} = -10 \lg \frac{1}{(D/d_0)^2 + (D/d_0)};$$

Зниження шуму для циліндричних хвиль:

$$\Delta L_{sp} = -10 \lg \frac{1}{\left(\frac{D}{d_0}\right) + 1};$$

Зниження шуму акустичним екраном за наявності імпедансних поверхонь

У разі розміщення акустичних екранів назовні вони завжди перебувають на імпедансній землі, а це відчутно змінює зниження шуму екранами відносно до зниження шуму для напівнескінченного плоского екрана.

Звукове поле в точці приймання розраховують за допомогою методу уявних джерел.

Звуковий тиск у точці приймання буде сумою чотирьох складових відповідно до чотирьох можливих шляхів, що проходять звукові промені від джерела шуму до приймача, як показано на рис. 3:

SER – промінь, що проходить шлях від джерела через кромку екрана до приймача;

S_iER – промінь, що відбивається від поверхні землі з боку джерела;

SER_i – промінь, що відбивається від поверхні землі з боку приймача;

S_iER_i – промінь, що відбивається від поверхні землі двічі з боку джерела та приймача.

Якщо земля є ідеально відбиваючою поверхнею, то загальне звукове поле згідно з геометричною акустиккою є сумою дифрагованих полів цих чотирьох променів:

$$P_C = p_1 + p_2 + p_3 + p_4,$$

де

$$p_1 = p(S, R, E);$$

$$p_2 = p(S_i, R, E);$$

$$p_3 = p(S, R_i, E);$$

$$p_4 = p(S_i, R_i, E).$$

Якщо земля є імпедансною поверхнею (наприклад, трава або пористе покриття дороги), то тиск для променів, відбитих від цих поверхонь, необхідно помножити на відповідні коефіцієнти відбиття для сферичних хвиль таким чином:

$$P_C = p_1 + Q_S p_2 + Q_R p_3 + Q_S Q_R p_4,$$

де Q_S та Q_R – коефіцієнти відбиття для сферичної хвилі з боку джерела та приймача відповідно.

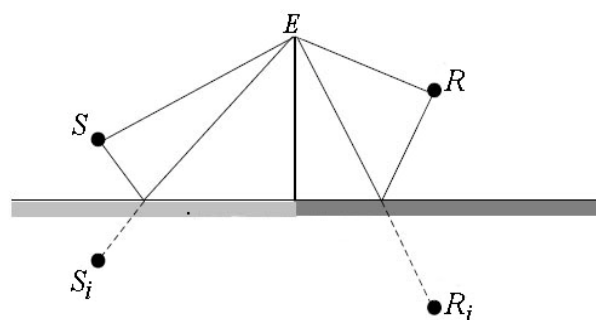


Рис. 3. Можливі шляхи проходження променів від джерела до приймача, коли екран розміщений на імпедансній поверхні:
 E – кромка екрана;
 R_i – уявний приймач;
 S_i – уявне джерело

Коефіцієнт відбиття для сферичної хвилі Q залежить від акустичних характеристик землі та геометрії джерело/приймач і розраховується таким чином [1]:

$$Q(S, R, \beta) = R_p + (1 - R_p)F(w), \quad (3)$$

де R_p – коефіцієнт відбиття плоскої хвилі:

$$R_p = \frac{\cos \theta - \beta}{\cos \theta + \beta}$$

θ – кут падіння відбитої звукової хвилі для джерела шуму розташованого в S , та приймача шуму, розташованого в R .

Кут падіння визначається для заданої геометрії джерело шуму/приймач. Множник $F(w)$ у формулі (3), також відомий як чинник граничних втрат, дорівнює:

$$F(w) = 1 + i\sqrt{\pi}we^{-w^2} \operatorname{erfc}(-iw),$$

де w – числова відстань:

$$w = \frac{1}{2}\sqrt{kd}(1+i)(\cos \theta + \beta);$$

k – хвильове число джерела шуму;

d – відстань від S до R ;

erfc – додаткова функція помилок.

Акустична ефективність екрана

Акустична ефективність екрана на землі характеризується двома критеріями: додаткове зниження шуму (excess attenuation – EA) та внесене зниження шуму екраном (insertion loss – IL), що розраховується за такими формулами:

$$EA = 20 \lg \left(\frac{p_0}{p_{\text{е.з.}}} \right);$$

$$IL = 20 \lg \left(\frac{p_3}{p_{\text{е.з.}}} \right),$$

де p_0 – рівень звукового тиску (РЗТ) в вільному полі;

$p_{\text{е.з.}}$ – РЗТ за наявності екрану та відбиваючої поверхні землі;

p_3 – РЗТ в вільному полі за наявності відбиваючої поверхні землі.

Якщо розрахунок виконувати лише стосовно до амплітуди (некогерентне сумування внеску всіх звукових променів),

тоді зниження шуму ΔL_n можна визначити для кожного окремого звукового променя, що проходить відповідний шлях, згідно з числом Френеля для цього променя.

Таким чином, додаткове зниження шуму екраном на абсолютно жорсткій поверхні розраховують за формулою

$$EA = 10 \lg \left(10^{\frac{|\Delta L_1|}{10}} + 10^{\frac{|\Delta L_2|}{10}} + 10^{\frac{|\Delta L_3|}{10}} + 10^{\frac{|\Delta L_4|}{10}} \right).$$

Зниження шуму екраном розраховують за допомогою емпіричних, аналітичних або числових формул залежно від складності моделі та необхідної точності. Якщо розрахунки потребують точного оцінювання як амплітуди, так і фази дифрагованих хвиль, доцільно використовувати аналітичні та числові формули. Для інженерних розрахунків, як правило, ефективність екрана визначають за допомогою емпіричних формул.

Вплив фасаду будівлі на формування звукового поля

Оцінюючи вплив фасаду на вимірювані РЗТ, найпростіше припустити, що фасад є напівнескінченим відбивачем. Таким чином, звукове поле біля фасаду будівлі визначається суперпозицією прямого променя від джерела шуму до приймача та відбитими променями. Реальні фасади мають кінцеві розміри, але ефекти дифракції на кромках фасаду є незначними у разі розміщення мікрофонів біля центра лінійної довжини фасаду, коли довжини хвиль малі порівняно з розмірами фасаду.

Для напівнескінченного відбивача звукове поле розраховують методом уявних джерел, згідно з яким у разі поширення звуку від джерела до приймача він проходить чотири різні шляхи (рис. 4).

Припускається, що:

– точкове джерело випромінює сферичні хвилі;

– поверхня землі та фасаду ідеально відбиваючі поверхні;

– відбиття дзеркальні;

– розміри фасаду значно більші від розмірів довжин хвиль;

– поблизу немає інших будівель.

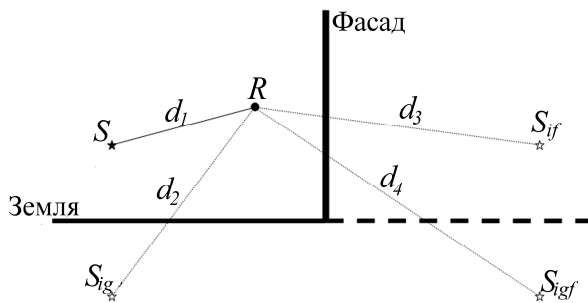


Рис. 4. Розрахункова схема визначення звукового поля біля фасаду будівлі: S_{ig} , S_{if} , S_{igf} – уявні джерела; d_1 , d_2 , d_3 , d_4 – відстані, що проходять звукові промені

Таким чином, зміна РЗТ за наявності визначається згідно з формулою Хопкінса [3] з введенням функції автокореляції:

$$\Delta L_{\phi} = 20 \lg \left| \frac{\langle p^2 \rangle_c}{\langle (p_1 + p_2)^2 \rangle} \right|;$$

$$\langle (p_1 + p_2)^2 \rangle = 1 + \left(Q_g \frac{d_1}{d_2} \right)^2 + Q_g \frac{2d_1}{d_2} R(\Delta d_{12});$$

$$\langle p^2 \rangle_c = 1 + \left(Q_g \frac{d_1}{d_2} \right)^2 + \left(Q_f \frac{d_1}{d_3} \right)^2 + \left(Q_g Q_f \frac{d_1}{d_4} \right)^2 + Q_g \frac{2d_1}{d_2} R(\Delta d_{12}) + Q_f \frac{2d_1}{d_3} R(\Delta d_{13}) + Q_g Q_f \frac{2d_1}{d_4} R(\Delta d_{14}) + Q_g Q_f \frac{2d_1^2}{d_2 d_3} R(\Delta d_{23}) + Q_g^2 Q_f \frac{2d_1^2}{d_2 d_4} R(\Delta d_{24}) + Q_g Q_f^2 \frac{2d_1^2}{d_3 d_4} R(\Delta d_{34}),$$

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:

$$R(\Delta d_{mn}) = \frac{\lambda}{2\pi B \Delta d_{mn}} \cos\left(\frac{2\pi \Delta d_{mn}}{\lambda}\right) \sin\left(\frac{2\pi B \Delta d_{mn}}{\lambda}\right)$$

Δd_{mn} – різниця ходу променів для двох променів m та n ,

$B=0,115$ для 1/3-октавної смуги частот;
 $B=0,332$ для октавної смуги частот.

Рівні звукового тиску перед фасадом будівлі (корпусом 9 Національного авіаційного університету) вимірювали для 1/3 діапазону частот. Шум генерувався зразковим джерелом шуму. Вимірювання виконували на чистому тоні.

Рівні звукового тиску перед фасадом вимірювали для двох відстаней від джерела шуму до фасаду будівлі – 9 та 15 м. Геометрію взаємного розташування джерела шуму, мікрофонів та фасаду будівлі показано на рис. 5.

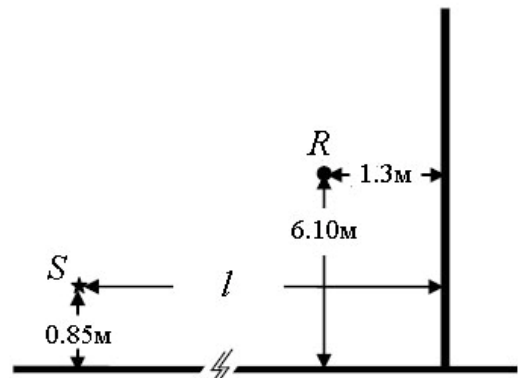


Рис. 5. Геометрія розташування джерело-приймач-фасад: l – відстань від фасаду до джерела

Розрахунки виконували за допомогою програмного забезпечення Spectran та MatLab.

На підставі вимірних значень РЗТ перед фасадом будівлі розраховували зміну РЗТ за наявності фасаду як напівнескінченного відбивача відносно РЗТ у вільному полі з відбиваючої поверхнею землі за формулою Хопкінса з введенням у формулу коефіцієнтів відбиття для сферичних хвиль для врахування імпедансних характеристик поверхні землі та фасаду. Результати розрахунків зміни рівнів звукового тиску для відстані 9 та 15 м від джерела шуму до фасаду будівлі показано на рис. 6.

Аналіз розрахунків показує, що зміна РЗТ переважно залежить від взаємного розташування джерела шуму та приймача відносно фасаду будинку та може як знижувати, так і підвищувати РЗТ за наявності фасаду.

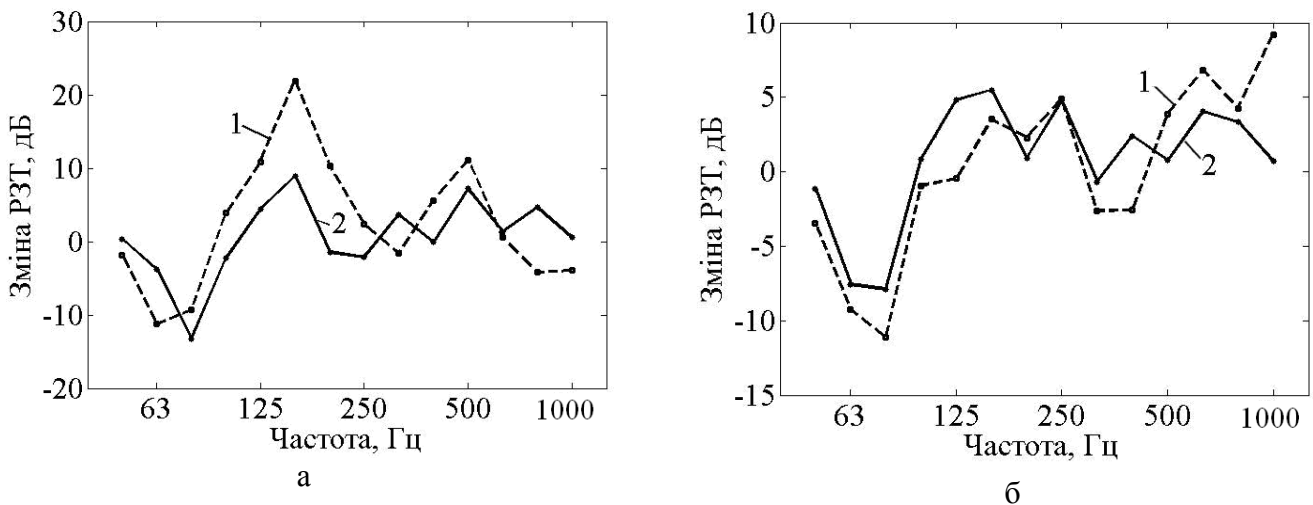


Рис. 6. Залежність зміни РЗТ від частоти для 1/3-октавного діапазону частот при відстані від джерела до фасаду:
 а – відстань 9 м;
 б – відстань 15 м;
 1 – результати натурних експериментів;
 2 – теоретичні розрахунки з використанням функції автокореляції

Основним ефектом, що визначає зміну РЗТ є ефекти інтерференції.

На частотах, вищих від 1000 Гц, хоч вони і бралися до уваги при розрахунках та вимірюваннях, під дією турбулентного повітря когерентність поширення хвиль знижувалася. Тому розрахунки не можуть відображати реальних значень без урахування додаткових метеорологічних умов.

Аналіз отриманих результатів показав, що для відстані 15 м від фасаду будівлі до джерела шуму теоретичні розрахунки краще підтверджуються експериментальними даними.

Це пояснюється тим, що за відстані 9 м від джерела шуму до фасаду будівлі значний вплив справляє ближнє звукове поле, впливаючи на достовірність розрахунків.

Висновки

Аналіз основних формул розрахунку ефективності акустичних екранів показав, що вибір моделі розрахунку залежить від необхідної точності результатів та допустимої складності моделі.

Оцінюючи ефективність акустичних екранів у реальних умовах, доцільно враховувати не тільки ефекти дифракції на кромці екрана, але й акустичні характеристики всіх відбиваючих поверхонь: як поверхні землі, так і поверхні самого екрану.

Під час розташування акустичних екранів на вулицях слід брати до уваги вплив фасадів будівель на формування звукового поля, оскільки наявність додаткової відбиваючої поверхні впливає на РЗТ.

Література

1. Li K.M. A review of commonly used analytical and empirical formulae for predicting sound diffracted by a thin screen / K.M. Li, H.Y. Wong // *Applied Acoustics*. – 2005. – Vol. 66. – P. 45–76.
2. Li K.M. The predicted barrier effects in the proximity of tall buildings / K.M. Li, S.H. Tang // *J. Acoust. Soc. Am.* – 2003. – Vol. 114 (2). — P. 821–832.
3. Hopkins C. Sound fields near building facades – comparison of finite and semi-infinite reflectors on a rigid ground plane / C. Hopkins, Y. Lam // *Applied Acoustics*. – 2009. – Vol. 70. – P. 300–308.