

Оцінка впливу двобічних округлих екранів на акустичне поле довкола лінійного джерела звуку

В. С. Дідковський, В. П. Заєць, С. Г. Котенко, В. І. Денисенко, Ю. Ф. Діденко

Досліджено акустичне поле транспортного потоку довкола шумозахисних екранів що розташовані з обох боків від джерела звуку.

Переважає кількість публікацій, яка присвячена темі захисту від шуму шумозахисними екранами, стосується оцінки ефективності екранів що розташовані з одного боку від джерела шуму. Вплив другого екрану на ефективність першого якщо і досліджувалася, то лише експериментальними шляхами. Тому оцінка взаємного впливу двох екранів, між якими розташоване лінійне джерело звуку, є актуальною проблемою.

Була зроблена постановка задачі, яка дозволила отримати аналітичний розв'язок та знаходити звукове поле довкола лінійного джерела звуку. При цьому з обох боків джерело звуку було обмежене акустично жорсткими екранами, що мають кінцеву товщину. Екрани за формою в перерізі є частинами кільця з довільними кутами та однаковим радіусом.

Розв'язок задачі виконувався методом часткових областей. Даний метод дозволив отримати нескінченну систему алгебраїчних рівнянь, що розв'язувалася методом редукції. Такий підхід до розв'язання проблеми дозволяє застосувати даний розв'язок до різних ситуацій взаємного розташування екранів, джерела та території, що захищається від шуму

Результати таких досліджень дозволяють оцінити поле між екранами, залежність збільшення звукового тиску на дорозі від геометричних розмірів екрану та ширини дороги. Крім того, результатом розв'язку стала можливість оцінити вплив одного екрану на ефективність іншого в діапазоні частот до 1000 Гц. Було показано, що взаємний вплив екранів може знизити ефективність екрану у 2 рази.

Такі дослідження дозволять більш точно розраховувати рівні звукового поля від транспортних потоків при застосуванні шумозахисних екранів, що часто зустрічається в практиці при проектуванні нових та реконструкції вже наявних автомобільних шляхів.

Ключові слова: округлий шумозахисний екран, метод часткових областей, двобічні шумозахисні екрани, зниження шуму.

1. Вступ

Шум є одним із небажаних факторів навколишнього середовища. Найбільшими джерелами шуму є транспортні магістралі [1, 2]. Шумозахисні екрани є одним із найбільш ефективних засобів зниження транспортного шуму.

На рівні звукового поля за екраном впливає велика кількість параметрів це в першу чергу геометричні розміри екранів та взаємне розташування джерела звуку екрану та області шумозахисту [3].

Також важливим є сама конструкція шумозахисного екрана його звукоізоляційні [4] та звукопоглинальні властивості [5]. Зокрема чимало робіт присвячено улаштуванню резонаторів Гельмгольца, як ефективного поглинача низькочастотного звуку [6, 7]. Великий вплив на зниження шуму екраном відбувається внаслідок неоднорідних атмосферних умов [8]: напряду та сили вітру, градієнту температур повітря тощо.

Серед факторів також можна виділити наявність з іншого боку від джерела звуку ще одного екрану. Наявність екранів з обох сторін дороги обумовлюється необхідністю знижувати рівні шуму по обидві сторони від транспортної магістралі. Така ситуація зустрічається завжди коли автодорога чи залізниця проходить через населений пункт. Внаслідок відбиття звуку від одного екрану відбита звукова хвиля починає розповсюджуватися в напрямку другого екрану, у зв'язку з чим рівні звуку збільшуються, а звукове поле змінюється за своєю структурою.

Тому аналітичне дослідження впливу двобічних екранів на акустичне поле довкола лінійного джерела звуку є актуальною задачею.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Системні дослідження ефективності шумозахисних екранів розпочалися у другій половині ХХ століття. В роботі [9] надано результати експериментальних досліджень поля довкола одиничних екранів та надано емпіричні формули для визначення ефективності екранів для точкових та лінійних джерел звуку. Пізніше в статті [10] запропоновано формулу для визначення ефективності екрану, яка дозволяла знаходити ефективність екранів в широкому діапазоні частот з достатньою на той момент точністю. Однак ці дослідження не враховували наявність дороги та інших відбивальних поверхонь. Пізніше, в роботі [11] проведено аналіз розповсюдження звукової хвилі між двома паралельними екранами з поверхнею землі між ними за допомогою лазера. Було прогнозовано рівні звуку на «освітленій» стороні екрану.

Згодом [12] була розроблена модель звукового поля довкола жорстких паралельних екранів. Ця модель базувалася на знаходженні звукового поля від уявних джерел звуку. В статті [13] було проведено порівняння результатів знаходження поля методом уявних джерел та числовим методом граничних областей. Таким чином були отримані просторові та спектральні характеристики зниження рівнів звуку за екраном, які вказували на характер зміни звукового тиску за екраном. Однак такий підхід є обмеженим у використанні, бо, як відомо, променева теорія поширення звуку має обмеження в низькочастотній області. Метод граничних областей є чисельним методом з наперед невідомою точністю.

Крім того, проводилися також і експериментальні дослідження впливу двобічних екранів на акустичне поле довкола джерел звуку. В дослідженні [14] показано що вплив другого екрану на ефективність першого є незначною. Цьо-

го ж твердження були й автори досліджень викладених у звіті [15]. Однак інші дослідження [16] при подібній відстані між екранами в 50 м показали зниження ефективності одного з екранів на 2,8 дБ. В роботі [17] також представлені результати натурних досліджень які також виявили зниження ефективності екрана на величину до 4,4 дБ. Тому оцінка впливу одного екрану на ефективність іншого не знайшла остаточного вирішення.

В статті [18] запропоновано для аналітичного знаходження акустичного поля в областях складної форми застосовувати метод часткових областей. В статті [19] навіть частково вдалося змоделювати поле довкола екранів з обох сторін дороги. В праці [20] було удосконалено попередню модель, наявністю щільної забудови за екранами. Однак методи оцінки звукового поля, що були наведені в цих працях, не знайшли свого практичного застосування, і наведені результати неможливо порівняти із даними інших дослідників.

Таким чином, постановка та аналітичне розв'язання задачі дозволить визначити не лише якісні, а й кількісні характеристики взаємного впливу екранів в широкому діапазоні частот.

3. Мета та задачі дослідження

Мета дослідження – оцінити вплив екранів з обох сторін джерела звуку на акустичне поле. Це дасть можливість покращити прогнозування рівнів звуку при проектуванні шумозахисних екранів.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі задачі:

- поставити та розв'язати математичну задачу щодо знаходження звукового поля від лінійного джерела звуку з двома округлими екранами;
- виявити вплив другого екрану на ефективність першого, при цьому визначити суттєві фактори, що впливають на зміну ефективності екрану.

4. Матеріали та методи досліджень

Для знаходження акустичного поля від джерела звуку довкола двох екранів було необхідно розв'язати рівняння Гельмгольца з виконанням відповідних граничних умов. Для цього було запропоновано таку конфігурацію джерела звуку екранів та поверхні землі яка дозволяє розбити всю область на кілька канонічних частин. В кожній частині поля вдалося записати розв'язок рівняння Гельмгольца в загальній формі, що дозволяє провести спряження цих областей на їх спільних межах.

Спряження областей відбувається за звуковим тиском та коливальною швидкістю, що відповідає потенціалу швидкості (Φ) та першій похідній потенціалу швидкості по координаті.

Розв'язок задачі містить в собі використання властивості ортогональних функцій що дозволяє перейти від системи функціональних нескінченних рядів до нескінченної системи алгебраїчних рівнянь що розв'язується методом редуції. Для отримання достатньої точності результатів необхідно утримати кілька сотень рівнянь, тому розв'язок системи й побудова звукових полів відбувалася у програмнім середовищі Matlab (США).

5. Результати дослідження акустичного поля довкола лінійного джерела звуку з двома екранами

5.1. Постановка та розв'язок задачі

Шумозахисні екрани за формою поперечного перерізу можуть мати вигляд як прямокутника (вертикального чи похилого), так і складнішої форми, в тому числі й сектора кільця. Екрани можуть бути розташовані як з однієї, так і з обох сторін від дороги.

Поверхня дороги, по якій рухається автотранспорт, найчастіше робиться з асфальтового чи бетонного покриття, тому його можна вважати акустично жорстким матеріалом. Поверхня за екраном також зазвичай є горизонтальною та акустично жорсткою.

Окрім того, транспортний рух у даному дослідженні розглядається як неперервне джерело звуку, характеристики якого по всій довжині не змінюються.

Всі ці умови та наближення призводять до задачі, геометрія якої зображена на рис. 1.

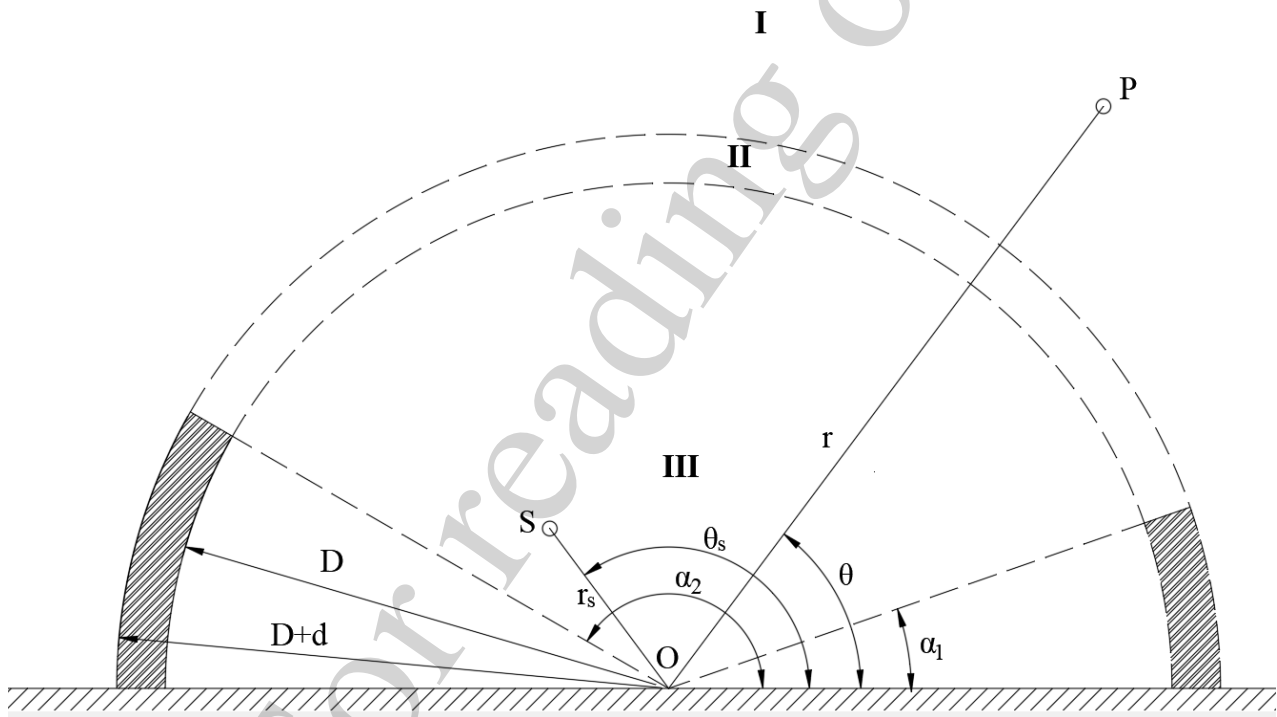


Рис. 1. Розрахункова геометрична модель двобічних округлих шумозахисних екранів

Як видно з рис. 1, весь повітряний простір довкола екрану було розділено на три області. Розподіл областей виконано таким чином, щоб для них можна було записати розв'язок рівняння Гельмгольца та виконати граничні умови.

Вище описана фізична модель зводиться до наступної задачі. Є півпростір, що обмежено акустично жорсткою поверхнею. В цьому півпросторі знаходяться два шумозахисні екрани однаковою товщиною d . Екрани утворені секторами двох нескінченно довгих циліндричних поверхонь радіусом D , що мають спільну вісь, яка розташована на поверхні акустично жорсткої півплощини.

Один торець екранів також розташований на акустично жорсткій площині, інший, під кутом α_1 та α_2 . Екрани є акустично жорсткими.

Джерело звуку – S , у вигляді нескінченно довгого циліндра нескінченно малого радіуса, що працює на нульовій моді коливань та випромінює гармонійну звукову хвилю з частотою f . Дане джерело знаходиться на відстані r_s від осі циліндричних поверхонь та під кутом α_s до акустично жорсткої площини.

Необхідно знайти акустичне поле в довільній точці P , яка знаходиться на довільній відстані r від осі циліндричних поверхонь та під довільним кутом θ до горизонтальної площини.

З огляду на геометрію задачі розмістимо полярну систему координат в точці O , що збігається з осями циліндричних поверхонь.

Як відомо [21], в полярній системі координат рівняння Гельмгольца для потенціалу швидкості Φ має вид:

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} - c^2 \left[\frac{1}{r} \left(\frac{\partial}{\partial r} r \frac{\partial \Phi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \theta^2} \right] = 0. \quad (1)$$

Частинний розв'язок представимо у формі:

$$\begin{aligned} \varphi_b(r, \theta) = & \left[A_b H_b^{(1)}(kr) + B_b H_b^{(2)}(kr) \right] \times \\ & \times \left[C_b \cos(b\theta) + D_b \sin(b\theta) \right], \end{aligned} \quad (2)$$

або

$$\begin{aligned} \varphi_b(r, \theta) = & \left[A_b J_b(kr) + B_b N_b(kr) \right] \times \\ & \times \left[C_b \cos(b\theta) + D_b \sin(b\theta) \right], \end{aligned} \quad (3)$$

де тут і надалі $H_b^{(1)}$, $H_b^{(2)}$, J_b та N_b – позначення циліндричних функцій, а саме, Ганкеля 1-го і 2-го роду, Бесселя та Неймана відповідно; $k = \omega/c$ – хвильове число. Причому використання того чи іншого розв'язку є довільним і залежить від граничних умов та геометрії задачі.

Область I.

Область I має вигляд області зовні круга радіусом $D+d$ з такими граничними умовами:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \theta} = 0 \quad \text{при} \quad \begin{cases} \theta = 0, r > D + d, \\ \theta = \pi, r > D + d. \end{cases} \quad (4)$$

Для цієї області застосуємо розв'язок рівняння Гельмгольца у вигляді (2). В цьому розв'язку функція $H_b^{(1)}$ описує хвилі, що розходяться з початку координат, а функція $H_b^{(2)}$ – хвилі що надходять із нескінченності.

Враховуючи умову випромінювання Зоммерфельда на нескінченності, в рівнянні (2) функцію $H_b^{(2)}(kr)$ можна відкинути, тому що відповідно геометрії області I хвиль, що надходять із нескінченності немає.

Тоді для задоволення умов на межі $\theta=0$ та $\theta=\pi$.

$$\begin{cases} -C_b \sin(b\theta) + \\ + D_b \cos(b\theta) = 0 \Big|_{\theta=0} \\ -C_b \sin(b\theta) + \\ + D_b \cos(b\theta) = 0 \Big|_{\theta=\pi} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} D_b = 0 \\ C_b \sin(\pi b) = 0 \end{cases} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \begin{cases} D_b = 0 \\ C_b = 0 \\ D_b = 0 \\ \sin(\pi b) = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \text{тривіальний випадок,} \\ D_b = 0, \\ b = n, n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \end{cases}$$

Запишемо:

$$\varphi_n(r, \theta) = \tilde{A}_n^{(1)} \cdot H_{\pi n}^{(1)}(kr) \cdot \cos(\pi n \cdot \theta), \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (5)$$

Повний розв'язок рівняння складається з повної суми частинних розв'язків.

Крім того, оскільки множники $\tilde{A}_n^{(1)}$ є невідомими, то можна кожний член суми поділити $H_{\pi n}^{(1)'}[k(D+d)]$, це дозволить спростити вирази при виконанні умов спряження:

$$\Phi_1 = \sum_{n=0}^{\infty} A_n^{(1)} \frac{H_{\pi n}^{(1)}(kr)}{H_{\pi n}^{(1)'}[k(D+d)]} \cos(n\theta). \quad (6)$$

Область II.

Область II має вигляд сектора кільця радіусами D та $D+d$ з такими граничними умовами:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial \theta} = 0 \text{ при } \begin{cases} \theta = \alpha_1, D+d \geq r > D, \\ \theta = \alpha_2, D+d \geq r > D. \end{cases} \quad (7)$$

Межі екрану при $\theta = \alpha_1$ та $\theta = \alpha_2$ є акустично жорсткими.

Скористаємося розв'язком (3) рівняння Гельмгольца. Тоді для задоволення умов на межі $\theta = \alpha_1$ та $\theta = \alpha_2$.

$$\begin{aligned} & \begin{cases} -C_b \sin(b\theta) + D_b \cos(b\theta) = 0 \Big|_{\theta=\alpha_1} \\ -C_b \sin(b\theta) + D_b \cos(b\theta) = 0 \Big|_{\theta=\alpha_2} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} D_b = 0 \\ C_b \sin[(\alpha_2 - \alpha_1)b] = 0 \end{cases} \Rightarrow \\ & \Rightarrow \begin{cases} D_b = 0 \\ C_b = 0 \\ D_b = 0 \\ \sin[(\alpha_2 - \alpha_1)b] = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \text{тривіальний випадок,} \\ D_b = 0, \\ b = \frac{\pi n}{\alpha_2 - \alpha_1}, n = 0, \pm 1, \pm 2 \dots \end{cases} \end{aligned}$$

Запишемо:

$$\begin{aligned} \varphi_n(r, \theta) = & A_n^{(2)} \cdot J_{\frac{\pi n}{\alpha_2 - \alpha_1}}(kr) \cos\left(\frac{\pi n}{\alpha_2 - \alpha_1} \cdot \theta\right) + \dots + \\ & + A_n^{(3)} \cdot N_{\frac{\pi n}{\alpha_2 - \alpha_1}}(kr) \cdot \cos\left(\frac{\pi n}{\alpha_2 - \alpha_1} \cdot \theta\right), \end{aligned} \quad n = 0, \pm 1, \pm 2 \dots$$

Провівши перетворення, подібні до розв'язку для першої області, можна записати потенціал швидкості Φ_{II} для області II у вигляді:

$$\Phi_{II} = \sum_{n=0}^{\infty} \left[A_n^{(2)} \cdot \frac{J_{\delta_1 n}(kr)}{J_{\delta_1 n}(kD)} + A_n^{(3)} \frac{N_{\delta_1 n}(kr)}{N_{\delta_1 n}(kD)} \right] \cos(\delta_1 n \theta), \quad (8)$$

де

$$\delta_1 = \frac{\pi}{\alpha_2 - \alpha_1}.$$

Область III.

Область III має вигляд напівкруга радіуса D з такими граничними умовами:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial r} = 0 \text{ при } \begin{cases} \theta = 0, r \leq D, \\ \theta = \pi, r \leq D. \end{cases} \quad (9)$$

Оскільки області III розташований початок координат, то також скористаємося розв'язком (3) рівняння Гельмгольца (1).

Враховуючи те, що функція Неймана (N) в початку координат прямує до мінус нескінченності, а функція Бесселя (J) до одиниці, то доданок $B_b N_b(kr)$ в розв'язку (3) відкидаємо, оскільки поле в початку координат є скінченним. Тоді провівши подібні математичні викладки отримаємо:

$$\Phi_3 = \sum_{n=0}^{\infty} A_n^{(4)} \cdot \frac{J_{\pi n}(kr)}{J'_{\pi n}(kD)} \cos(\pi n \theta). \quad (10)$$

Дифракційне поле від джерела звуку.

Для однозначності будемо вважати, що джерело звуку знаходиться в зоні III, тобто $r_s < D$.

Дифракція нескінченного циліндричного джерела звуку малих хвильових розмірів на клині з акустично жорсткими поверхнями та кутом розкриття π описується виразом [22]:

$$\Phi_0 = \frac{i}{2} \begin{cases} \sum_{n=0}^{\infty} \varepsilon_n H_n^{(1)}(kr_s) J_n(kr) \times \\ \times \cos(n\theta_s) \cos(n\theta), & r < r_s, \\ \sum_{n=0}^{\infty} \varepsilon_n J_n(kr_s) H_n^{(1)}(kr) \times \\ \times \cos(n\theta_s) \cos(n\theta), & r \geq r_s, \end{cases} \quad (11)$$

де Φ_0 – потенціал коливальної швидкості, що випромінюється джерелом;

$$\varepsilon_n = \begin{cases} 1, & n = 0, \\ 2, & n > 0. \end{cases}$$

Тоді поле в області III буде визначатися як:

$$\Phi_{III} = \Phi_3 + \Phi_0. \quad (12)$$

Запишемо умови спряження полів на границях:

Оскільки рівняння Гельмгольца є диференціальним рівнянням 2-го порядку, то спряження областей має виконуватися за потенціалом швидкості – що відповідає звуковому тиску, та першою похідною потенціалу швидкості – що відповідає коливальній швидкості частинок середовища.

За тиском:

$$\Phi_I = \Phi_{II}, \quad r = D + d, \quad \theta \in [\alpha_1, \alpha_2], \quad (13)$$

$$\Phi_{II} = \Phi_{III}, \quad r = D, \quad \theta \in [\alpha_1, \alpha_2]. \quad (14)$$

За швидкістю:

$$\frac{\partial \Phi_I}{\partial r} = \begin{cases} \frac{\partial \Phi_{II}}{\partial r}, & r = D + d, \quad \theta \in [\alpha_1, \alpha_2], \\ 0, & r = D + d, \quad \theta \in [0, \alpha_1] \cup [\alpha_2, \pi], \end{cases} \quad (15)$$

$$\frac{\partial \Phi_{III}}{\partial r} = \begin{cases} \frac{\partial \Phi_{II}}{\partial r}, & r = D, \quad \theta \in [\alpha_1, \alpha_2], \\ 0, & r = D, \quad \theta \in [0, \alpha_1] \cup [\alpha_2, \pi]. \end{cases} \quad (16)$$

Підставляючи вирази (6), (8), (10)–(12) в умови спряження (13)–(16) і використовуючи властивості ортогональних функцій, як це описано в [4, 23], можна отримати нескінченну систему алгебраїчних рівнянь відносно невідомих $A_n^{(1)} - A_n^{(4)}$, яка розв'язується методом редукції.

5. 2. Оцінка впливу другого екрану на ефективність першого

5. 2. 1. Загальні положення

Оцінка результатів полягала в побудові поля ефективності шумозахисних екранів та аналізі числових значень ефективності. Під ефективністю екрана, як і раніше [3–5] мається на увазі різниця рівнів звукового тиску поля без екрана та з екраном:

$$dL = 20 \lg \left(\frac{p_{with}}{p_{out}} \right), \quad (17)$$

де p_{with} – звуковий тиск при застосуванні екранів і визначається потенціалами швидкості $\Phi_I - \Phi_{III}$ – (6), (8), (12) у відповідній області; p_{out} – звуковий тиск за відсутності екранів і визначається потенціалом швидкості джерела звуку Φ_0 (11).

При цьому звуковий тиск без екрану та з екраном було отримано для 25 частот (23), що рівномірно розподілені в октавній смузі. Такий підхід дозволив змоделювати шумовий сигнал та позбутися яскраво вираженої інтерференційної картини, що характерна лише для тональних сигналів [4, 24]:

$$\bar{p} = \sqrt{\sum_{i=1}^{25} [p(f_i)]^2}, \quad (18)$$

де $p(f_i)$ – поле звукового тиску на i -й частоті в межах однієї октавної смуги, Па;
 \bar{p} – середній звуковий тиск в октавній смузі частот, Па.

На рис. 2, а наведене типове звукове поле довкола двобічних екранів, а на рис. 2, б подане поле ефективності. Від'ємні значення показують, що звуковий тиск збільшився.

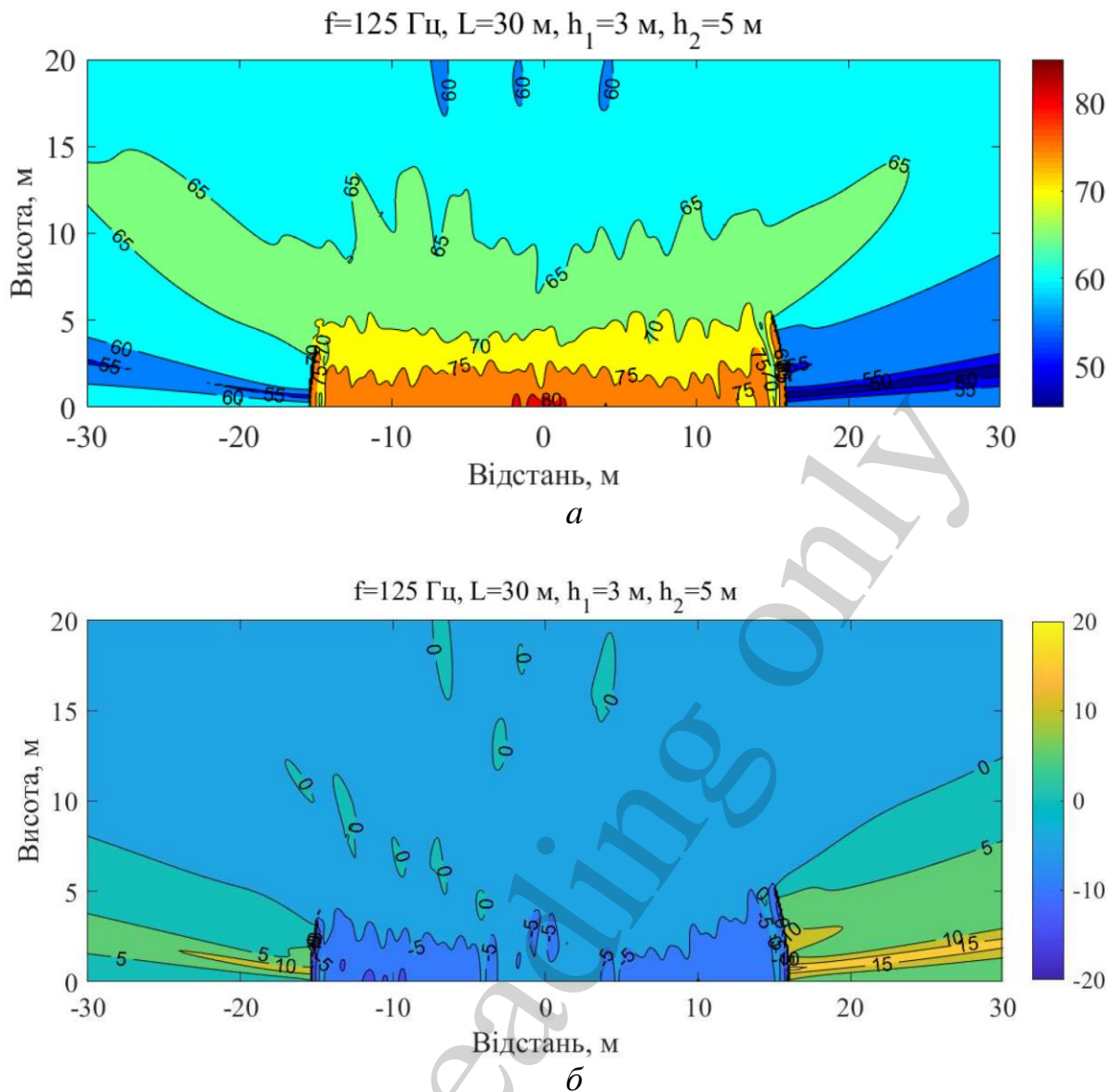


Рис. 2. Звукові поля довкола лінійного джерела звуку з двома екранами (частота – 125 Гц, відстань між екранами $L=30$ м, висота екрану ліворуч $h_1=3$ м, висота екрану праворуч $h_2=5$ м): *a* – поле рівнів звукового тиску; *b* – поле ефективності

Як можна побачити на рис. 2, *a* звуковий тиск між екранами майже не змінюється з відстанню, що вказує на те, що відбитий звук від екранів, має суттєві рівні. Збільшення рівнів звуку на дорозі за рахунок впливу двох екранів для частоти 125 Гц (рис. 2, *b*) знаходиться в межах від 5 дБ до 10 дБ.

5. 2. 2. Ефективність шумозахисних екранів

Для проведення аналізу звукового поля довкола шумозахисних екранів було проведено розрахунок звукових полів для трьох октавних смуг частот з середньгеометричними частотами f – 31,5 Гц, 125 Гц і 500 Гц. При цьому відстань між екранами L становила 10 м, 20 м та 30 м, а висота h_1 та h_2 екранів – 3 м, 5 м та 7 м (рис. 3). Товщина екрану d в усіх випадках була 0,1 м.

На рис. 3, *а-в* наведено значення ефективності шумозахисних екранів на відстані 30 м від джерела звуку для октавних смуг частот з середньгеометричною частотою 31,5 Гц, 125 Гц та 500 Гц відповідно.

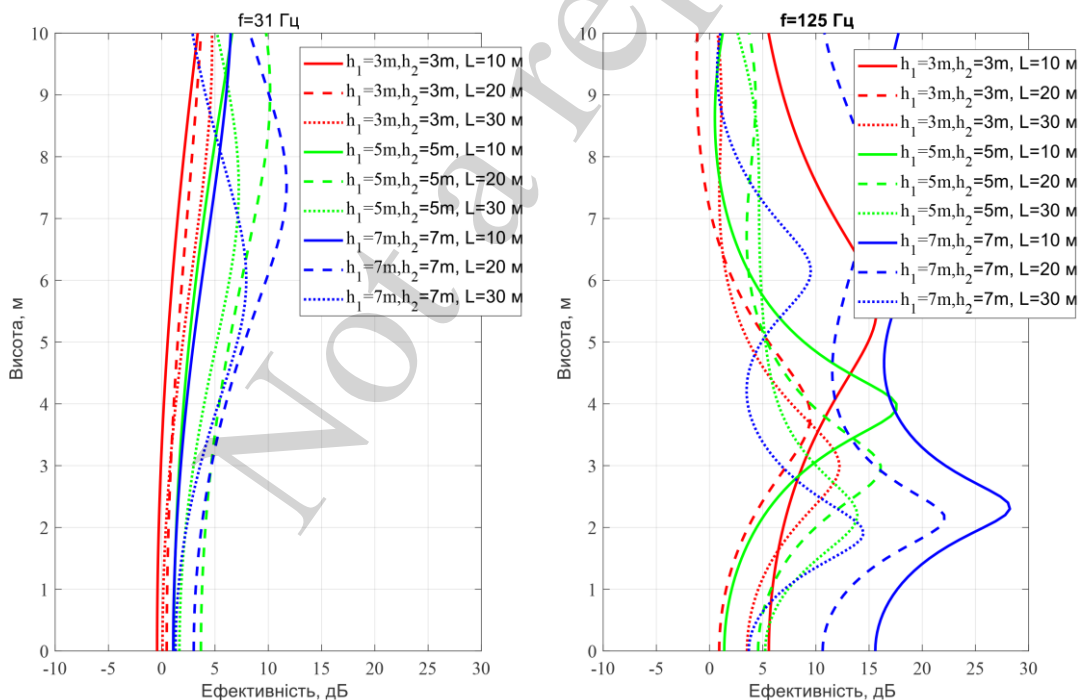
Як можна побачити на рис. 3, *а* ефективність екранів на частоті 31 Гц є досить незначною і біля поверхні землі знаходиться в межах від 0 дБ до 4 дБ.

Нижня границя діапазону відповідає екранам висотою 3 м, а верхня частина діапазону – 7 м. Також можна побачити, що в біля поверхні землі найбільша ефективність екранів спостерігається при відстані між екранами, що дорівнює 20 м. Для відстаней як 10 м, так і 30 м між екранами їх ефективність є меншою.

Зі збільшенням частоти до 125 Гц (рис. 3, *б*) вплив висоти екранів та відстаней між ними стає більш суттєвою. Так ефективність екранів висотою 3 м знаходиться в межах від 2 дБ до 7 дБ біля поверхні землі та зростає до 11–16 дБ для екранів висотою 7 м.

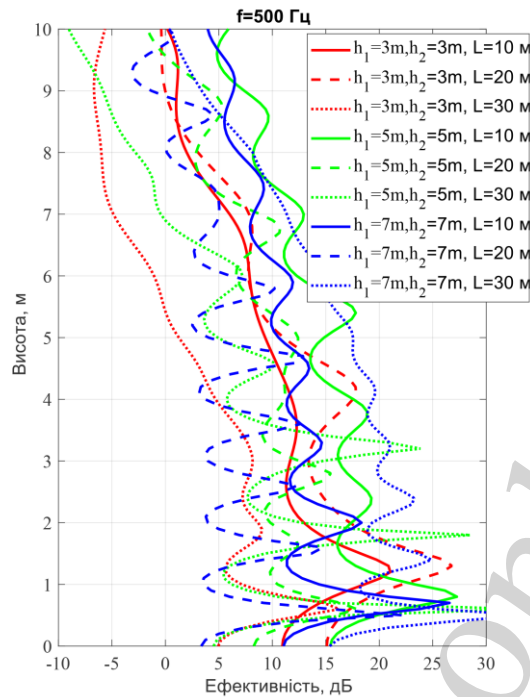
При подальшому збільшенні частоти до 500 Гц спостерігаються флуктуації ефективності екрану в діапазоні 5–25 дБ й прослідити якусь закономірність досить важко.

В цілому можна стверджувати, що наявність другого екрану призводить до зменшення ефективності першого екрану і в цілому ефективність екранів обмежується величиною 20–25 дБ.



а

б



в

Рис. 3. Ефективність шумозахисних екранів на відстані 30 м від джерела звуку за різних висот екранів та відстані між екранами: *a* – $f=31$ Гц; *б* – $f=125$ Гц; *в* – $f=500$ Гц

5. 2. 3. Вплив одного екрану на ефективність іншого

В статті [24] було наведена постановка та розв’язок задачі про знаходження звукового поля щодо одностороннього округлого шумозахисного екрана. Результати розв’язку тієї задачі були порівняні з результатами знаходження звукового поля при наявності двох екранів. Різниця ефективності одностороннього та двосторонніх екранів наведена на рис. 4. Результати розрахунку наведені для точок на відстані 30 м, по горизонталі від джерела шуму. Від’ємні значення вказують на зниження ефективності екрану в наслідок наявності іншого екрану.

На рис. 4, *a* можна побачити що зменшення ефективності екрану висотою 3 м на частоті 31 Гц становить від 2–4 дБ і майже не залежить від висоти іншого екрану та відстані між ними.

При збільшенні висоти екрану до 7 м (рис. 4, *в*) вплив другого екрану стає суттєвішим. Так при висоті другого екрану 3 м, зниження ефективності першого становить 2–3 дБ і майже не залежить від відстані між екранами. При зростанні висоти другого екрану до 7 м, зниження ефективності першого екрану становить 4–7 дБ нижня межа відповідає відстані 10 м між екранами, а верхня – 30 м між екранами.

При збільшенні частоти до 500 Гц в цілому вплив другого екрану стає більш помітним. Для екрана 3 м наявність іншого екрану призводить до зниження ефективності на величину 5–11 дБ і майже не залежить від відстані між екранами. Якщо висота першого екрану збільшується до 7 м, то й вплив другого екрану зростає

і знаходиться в межах від 7 до 15 дБ. Причому нижня межа відповідає висоті другого екрану 3 м, верхня межа – для висоти другого екрану 7 м.

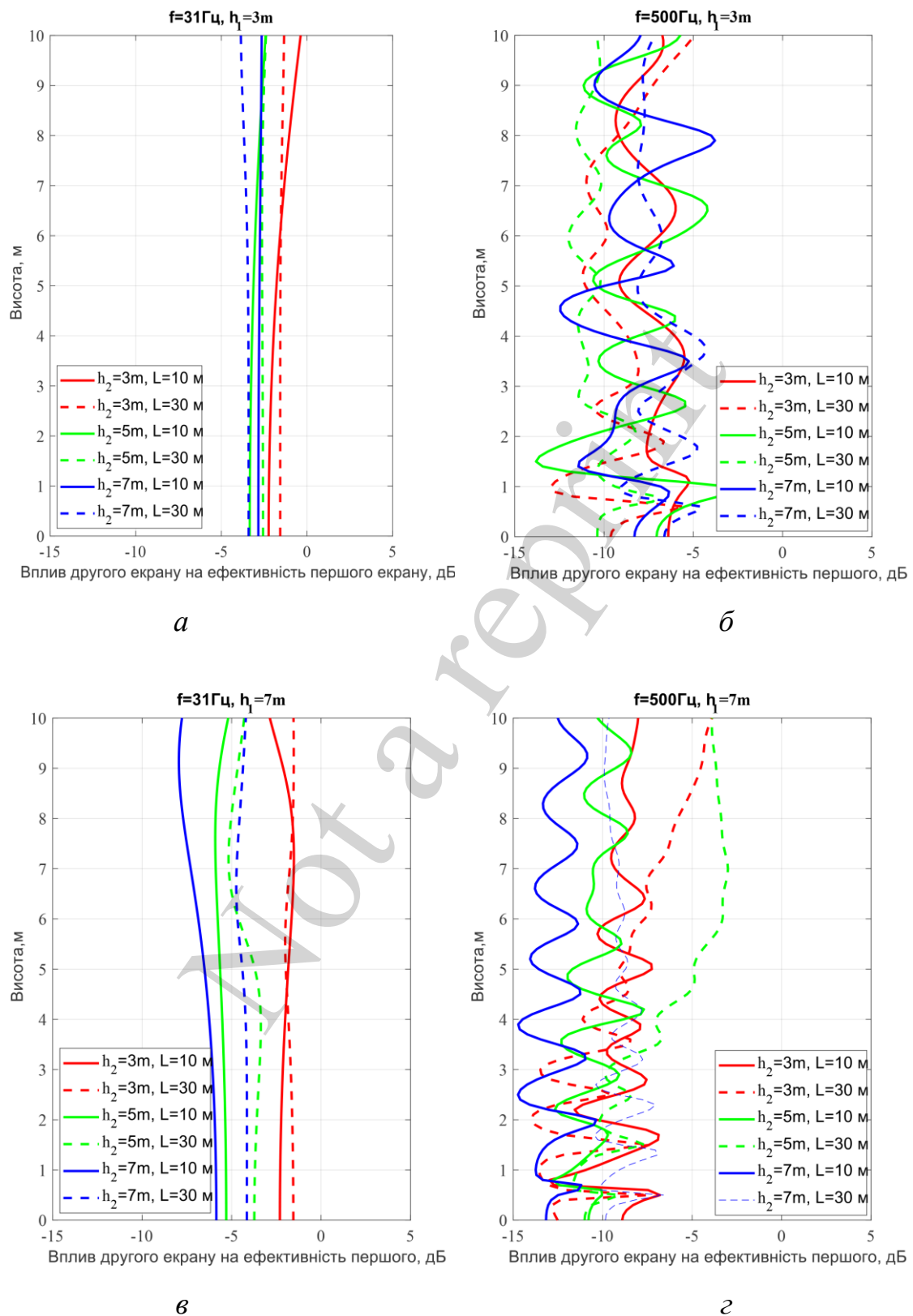


Рис. 4. Вплив другого екрану на ефективність першого (точки розрахунку на відстані 30 м від джерела звуку): а – $f=31$ Гц, $h_1=3$ м; б – $f=500$ Гц, $h_1=3$ м; в – $f=31$ Гц, $h_1=7$ м; з – $f=500$ Гц, $h_1=7$ м

6. Обговорення результатів дослідження впливу двобічних екранів на акустичне поле

Застосування методу часткових областей дозволило поставити та розв'язати задачу про знаходження поля довкола лінійного джерела звуку, що обмежене акустично жорсткою напівплощиною та двома акустично жорсткими округлими шумозахисними екранами різної висоти. Як показали дослідження, проведені в роботі [25], в дальньому полі результати отримані для округлих екранів цілком можуть бути порівняні із результатами для прямих вертикальних екранів.

Тому можна стверджувати, що другий екран вносить суттєву зміну в характер звукового поля довкола джерела звуку, а також призводить до зменшення ефективності екранів.

Показано, що наявність другого екрану на низьких частотах призводить до зниження ефективності екрану на величину до 6 дБ (рис. 4, в), що становить більше ніж половина всієї ефективності екрану (рис. 3, а).

На вищих частотах зменшення ефективності є ще більшою і сягає величини 15 дБ (рис. 4, г) для частоти 500 Гц, що порівняно із ефективністю екрану що залишилася (рис. 3, в). Тобто втрата ефективності становить також близько 50 %.

Зрозуміло, що отримані величини є максимальними значеннями в оцінці втрати ефективності, оскільки в моделі всі поверхні були акустично жорсткими і поглинання рівнів звукового тиску в атмосфері не був врахований. В реальній ситуації при імпедансних поверхнях землі та поверхнях шумозахисних екранів вплив другого екрану на ефективність першого має бути меншим.

В межах даної роботи оцінка впливу звукопоглинальних властивостей екранів на їх акустичну ефективність не було проведено, однак в подальших дослідженнях це обов'язково необхідно зробити. Крім того, доцільно проведення натурних вимірювань або лабораторних досліджень на моделі.

Дана модель може бути застосована лише для звуковідбивних шумозахисних екранів в низько- та середньочастотному діапазоні з частотами до 1000 Гц.

Також слід зауважити, що поле між екранами також зазнало суттєвих змін в порівнянні із полем з одним екраном [24]. Як показано на рис. 2, б рівні звукового тиску збільшилися в середньому на величину більше ніж 5 дБ, що також потребує подальшого дослідження з урахуванням більш реальних звукопоглинальних властивостей екранів.

7. Висновки

1. Завдяки застосуванню метода часткових областей вдалося поставити та розв'язати задачу про знаходження поля довкола лінійного джерела звуку з екранами з обох боків. Надання екранам округлої форми дозволило зменшити кількість областей, а відповідно і невідомих, що необхідно знайти при розв'язанні задачі в порівнянні із задачею для вертикальних екранів [19]. Крім того, така постановка задачі дозволяє завдавати реальну ширину екрана, змінювати висоти екранів незалежно один від одного та відстань між ними, що дозволяє розширювати практичну сферу застосування розв'язків.

2. За результатами розрахунку було виявлено вплив другого екрану на ефективність першого. Показано, що зниження ефективності екрану може сяга-

ти величини 50 % і залежить як від частоти звуку так і відстані між екранами та їх висоти. Показано що чим більша відстань між екранами, тим їх взаємний вплив є меншим особливо на низьких частотах.

Література

1. Maraş, E. E., Uslu, G., Uslu, A. (2016). Effects of Noise Barriers on Reducing Highway Traffic Noise. *International Refereed Journal of Engineering and Science*, 5 (2), 01–11. URL: <http://www.irjes.com/Papers/vol5-issue2/A520111.pdf>
2. Mozhaiv, O., Kuchuk, H., Shvets, D., Tretiak, V., Tretiak, M., Ostropilets, V. et. al. (2019). Minimization of power losses by traction-transportation vehicles at motion over a bearing surface that undergoes deformation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1 (1), 69–74. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.156721>
3. Echevarria Sanchez, G. M., Van Renterghem, T., Thomas, P., Botteldooren, D. (2016). The effect of street canyon design on traffic noise exposure along roads. *Building and Environment*, 97, 96–110. doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.11.033>
4. Zaets, V., Kotenko, S. (2017). Investigation of the efficiency of a noise protection screen with an opening at its base. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (5 (89)), 4–11. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.112350>
5. Didkovskiy, V., Zaets, V., Kotenko, S. (2020). Improvement of the efficiency of noise protective screens due to sound absorption. *Technology Audit and Production Reserves*, 3 (1 (53)), 11–15. doi: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2020.206018>
6. Wang, Z. B., Choy, Y. S. (2019). Tunable parallel barriers using Helmholtz resonator. *Journal of Sound and Vibration*, 443, 109–123. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2018.11.013>
7. Didkovskiy, V., Naida, S., Zaets, V. (2019). Experimental study into the Helmholtz resonators' resonance properties over a broad frequency band. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1 (5 (97)), 34–39. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.155417>
8. Heimann, D. (2010). On the Efficiency of Noise Barriers Near Sloped Terrain – A Numerical Study. *Acta Acustica United with Acustica*, 96 (6), 1003–1011. doi: <https://doi.org/10.3813/aaa.918363>
9. Maekawa, Z. (1968). Noise reduction by screens. *Applied Acoustics*, 1 (3), 157–173. doi: [https://doi.org/10.1016/0003-682x\(68\)90020-0](https://doi.org/10.1016/0003-682x(68)90020-0)
10. Kurze, U. J. (1974). Noise reduction by barriers. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 55 (3), 504–518. doi: <https://doi.org/10.1121/1.1914528>
11. Hutchins, D. A., Pitcarn, D. (1983). A laser study of multiple reflections within parallel noise barriers. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 73 (6), 2216–2218. doi: <https://doi.org/10.1121/1.389548>
12. Muradali, A., Fyfe, K. R. (1998). A study of 2D and 3D barrier insertion loss using improved diffraction-based methods. *Applied Acoustics*, 53 (1-3), 49–75. doi: [https://doi.org/10.1016/s0003-682x\(97\)00040-6](https://doi.org/10.1016/s0003-682x(97)00040-6)

13. Salomons, E. M., Geerlings, A. C., Duhamel, D. (1997). Comparison of a ray model and a Fourier-boundary element method for traffic noise situations with multiple diffractions and reflections. *Acta Acustica united with Acustica*, 83 (1), 35–47. URL: <https://www.ingentaconnect.com/content/dav/aaau/1997/00000083/00000001/art00009>
14. Halliwell, R. E. (1982). Field performance of parallel barriers. *Canadian Acoustics*, 10 (3), 9–18. URL: <https://jcaa.caa-aca.ca/index.php/jcaa/article/view/486/155>
15. Nelson, P. M., Abbott, P. G., Salvidge, A. C. (1977). Acoustic performance of the M6 noise barriers (No. LR-731 Lab. Rpt.).
16. Fleming, G. G., Rickley, E. J. (1992). Parallel barrier effectiveness under free-flowing traffic conditions (No. FHWA-RD-92-068; DOT-VNTSC-FHWA-92-1; HW227/H2002/4E7B1112). United States. Federal Highway Administration. URL: <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/8967>
17. Watts, G. R. (1996). Acoustic performance of parallel traffic noise barriers. *Applied Acoustics*, 47 (2), 95–119. doi: [https://doi.org/10.1016/0003-682x\(95\)00031-4](https://doi.org/10.1016/0003-682x(95)00031-4)
18. Mobarakeh, P. S., Grinchenko, V. T. (2015). Construction Method of Analytical Solutions to the Mathematical Physics Boundary Problems for Non-Canonical Domains. *Reports on Mathematical Physics*, 75 (3), 417–434. doi: [https://doi.org/10.1016/s0034-4877\(15\)30014-8](https://doi.org/10.1016/s0034-4877(15)30014-8)
19. Вовк, И. В., Мацьпура, В. Т. (2010). Шумозащитные свойства барьеров, размещенных вдоль обеих сторон транспортной магистрали. *Акустичний вісник*, 13 (4), 3–14. URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/79836>
20. Вовк, И. В., Гринченко, В. Т., Мацьпура, В. Т. (2012). Шумозащитные свойства барьеров, размещенных вдоль городской улицы. *Акустичний вісник*, 15 (2), 3–16. URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/116171>
21. Абрамовиц, М., Стиган, И. (Ред.) (1979). *Справочник по специальным функциям*. М.: Наука, 832.
22. Шендеров, Е. Л. (1972). *Волновые задачи гидроакустики*. Л.: Судостроение, 347.
23. Грінченко, В. Т., Вовк, І. В., Маципура, В. Т. (2007). *Основи акустики*. Київ: Наукова думка, 640.
24. Didkovskyi, V., Zaets, V., Kotenko, S. (2021). Revealing the effect of rounded noise protection screens with finite sound insulation on an acoustic field around linear sound sources. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1 (5 (109)), 16–22. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.224327>
25. Zaets, V. (2021). Influence estimation of the inclination angle of the top of the noise protection barrier on its efficiency. *Technology Audit and Production Reserves*, 1 (1 (57)), 12–16. doi: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2021.225474>