

УДК 534.26

DOI: 10.15587/2312-8372.2020.206018

## ПОКРАЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ШУМОЗАХИСНИХ ЕКРАНІВ ЗА РАХУНОК ЗВУКОПОГЛИНАННЯ

Дідковський В. С., Заєць В. П., Котенко С. Г.

Об'єктом дослідження є звукове поле від лінійних джерел звуку довкола шумозахисних екранів. Зменшення рівнів звуку за екраном в першу чергу обумовлено геометричними розмірами екрану та взаємним розташуванням екрана та джерела звуку. Впливу даних факторів приділялася велика кількість наукових публікацій. Однак проблемним місцем таких досліджень є те, що екрани вважались або повністю акустично жорсткими або звукопоглинальними.

В даній роботі розглянуто ситуацію імпедансного екрану, що досить часто застосовується на практиці. Розрахунок поля довкола такого екрану проводився засобами комп'ютерного моделювання, що дозволяє легко змінювати величину акустичного імпедансу поверхні екрану.

Для обчислення звукового поля довкола екрану було обрано метод скінченних елементів. Звукопоглинальні властивості екрана визначалися зміною акустичного імпедансу лицьової сторони екрана. При цьому екран залишався акустично непрозорим. Таким чином, було проведено аналіз впливу коефіцієнта звукопоглинання на звукове поле довкола екрана за різних висот екрану та відстані джерел звуку до екрана. Це дозволило отримати результати рівнів звукового тиску довкола екранів, що зустрічаються в інженерній діяльності. Проведені дослідження показали, що використання звукопоглинального облицювання шумозахисних екранів дозволяє збільшити їх ефективність. Виявлено, що чим ближче екран розташовано до джерела звуку, тим більший вплив його звукопоглинальних властивостей. Показано, що для низьких частот збільшення ефективності екрану за рахунок звукопоглинання може сягати величини 5 дБ.

Отримані у ході дослідження результати можна використовувати при проектуванні шумозахисних екранів для зниження рівнів шуму від транспортних потоків. Особливо корисними отримані результати будуть при проектуванні екранів з висотами більше 4 м.

**Ключові слова:** шумозахисний екран, дифракція звуку, зменшення рівня звуку, імпедансні властивості, звукопоглинальний екран.

### 1. Вступ

Шумозахисні екрани є одними із найефективніших способів зниження шуму різних джерел шуму [1, 2]. В усьому світі найбільш розповсюдженим джерелом надмірного шуму є транспортні потоки, які по різних даним вкривають від 50 % до 70 % територій поселень [3, 4]. Останнім часом велика увага приділяється будівництву нових та реконструкції вже існуючих

транспортних магістралей для збільшення інтенсивності транспортних перевезень та покращення безпеки їх експлуатації. Однією із вимог по безпечній експлуатації будь-яких будівельних об'єктів, до яких безперечно входять і автомобільні та залізничні шляхи, є вимога «захист від шуму» [5].

Як показують численні дослідження, ефективність екранів в першу чергу залежить від висоти екрану. Наводяться дані [6], що зі збільшенням екрану на 1 м його ефективність збільшується на 1,5–2 дБА. Однак будівництво високих екранів (висотою понад 6 м) пов'язане з великими складнощами – збільшенням вітрових та снігових навантажень. Це в свою чергу призводить до збільшення розмірів несучих елементів та фундаментів, що відображається на надмірних матеріальних затратах.

Тому пошук шляхів збільшення ефективності шумозахисних екранів при сталих геометричних розмірах є актуальною задачею, вирішення якої дозволить зменшити матеріальні витрати.

## **2. Об'єкт дослідження та його технологічний аудит**

*Об'єктом дослідження* є звукове поле від лінійних джерел звуку довкола імпедансного шумозахисного екрану.

Шумозахисні екрани, що встановлюються вздовж автомобільних доріг зазвичай виготовляються у вигляді вертикальних стінок із акустично жорстких матеріалів, що мають дуже низький коефіцієнт звукопоглинання.

Застосування звукопоглинального облицювання екранів досліджувалося мало й тому вплив коефіцієнта звукопоглинання екранів на акустичне поле довкола нього є до кінця не вивченим.

## **3. Мета та задачі дослідження**

*Мета дослідження* – оцінити вплив звукопоглинальних властивостей шумозахисних екранів на його ефективність.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі задачі:

1. Визначити взаємозв'язок звукопоглинальних властивостей екрану та збільшення його ефективності.
2. Визначити максимальне можливе збільшення ефективності екрану за рахунок звукопоглинання.

## **4. Дослідження існуючих рішень проблеми**

Проблемами застосування шумозахисних екранів та знаходження їх ефективності в світі почали займатися з середини 60-х років минулого століття. В основу таких досліджень покладено роботу [7], однак експериментальні дослідження авторів цієї роботи базувалися на знаходженні шумозахисного екрану без врахування впливу землі. Пізніше були проведені лабораторні дослідження зниження ефективності шумозахисних екранів для точкових джерел звуку та отримані наближені вирази по знаходженню їх ефективності з урахуванням відбиття звуку від поверхні землі [8]. Дані дослідження базувалися на теорії геометричної акустики, що призвело до обмеження сфери застосування отриманих виразів в області низьких та середніх частот.

З розвитком обчислювальної техніки стало можливим проводити комп'ютерне моделювання акустичного поля довкола екрана. Найбільш широко знайшли своє застосування метод граничних областей [9] та метод кінцевих елементів [10]. У [11] показано, що метод граничних областей може бути застосований для будь-якої геометричної системи із довільними граничними умовами, але час розрахунку буде фактором, який обмежує складність системи, і підходить для розв'язків зовнішніх задач. В той час як метод кінцевих елементів дозволяє розв'язувати внутрішні задачі за рахунок розбиття області розв'язку на елементарні частинки [12]. Загальним недоліком числових методів лишається невизначеність похибки розрахунків і найбільш розповсюдженим способом оцінки адекватності комп'ютерної моделі є порівняння результатів розрахунків з натурними чи модельними експериментами.

В роботах [13, 14] розглянуто застосування різних за геометрією кромek екранів як один із способів збільшення ефективності шумозахисних екранів. В даній роботі показано, що застосування різних верхніх кромek екрану призводить до збільшення їх ефективності на величину до 10 дБ. Однак дане значення було отримано для дискретних частот, в той час як транспортний шум, як відомо, є неперервним за спектром, і тому ефективність застосування таких дифузорів не є доведеною.

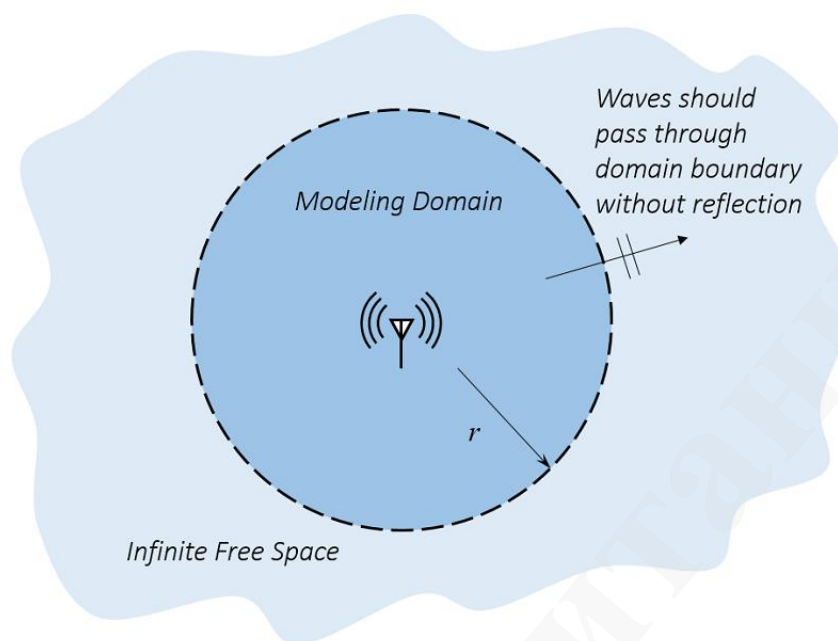
Одним із способів збільшення ефективності екранів є застосування звукопоглинальних конструкцій на стороні екрану, що обернена в бік джерела звуку. Літературні дані [15] вказують на збільшення ефективності екрану за рахунок поглинання звуку на величину до 9 дБ, що є досить значним показником. Інші дані, наведені в роботах [16, 17], показують, що зниження рівня звуку за екраном за рахунок його звукопоглинальних властивостей не є суттєвим.

Таким чином, саме невизначеність в оцінках впливу звукопоглинання екрану на його ефективність спонукала до проведення дослідження цього питання. Крім того в зв'язку з практичним проектуванням екранів авторами роботи проведено дослідження впливу звукопоглинання екрану на його ефективність.

## **5. Методи досліджень**

Вказані задачі було вирішено методом комп'ютерного моделювання. За допомогою програмного забезпечення Comsol Multiphysics було створено модель відбиваючого шумозахисного екрану та екрану зі звукопоглинальними властивостями. Акустичне поле довкола екранів знаходилося методом часткових елементів.

При вирішенні хвильових задач виникає необхідність моделювання області вільного поля – така границя розрахункової області, через яку акустичні хвилі проходили б без будь-якого відбиття (рис. 1). Для даної моделі була застосована умова ідеально узгоджених шарів для обмеження області чисельного моделювання – perfectly matched layer (PML).



**Рис. 1.** Схематичне зображення умови PML

Таким чином, застосування PML дозволяє розраховувати звукове поле від різних джерел звуку в обмеженій області й при цьому не враховувати відбиття звуку від меж цієї області. Це дозволяє будувати моделі значно меншого об'єму, що зменшує ресурсні витрати на прорахунок поля без погіршення точності розрахунків.

## **6. Результати досліджень**

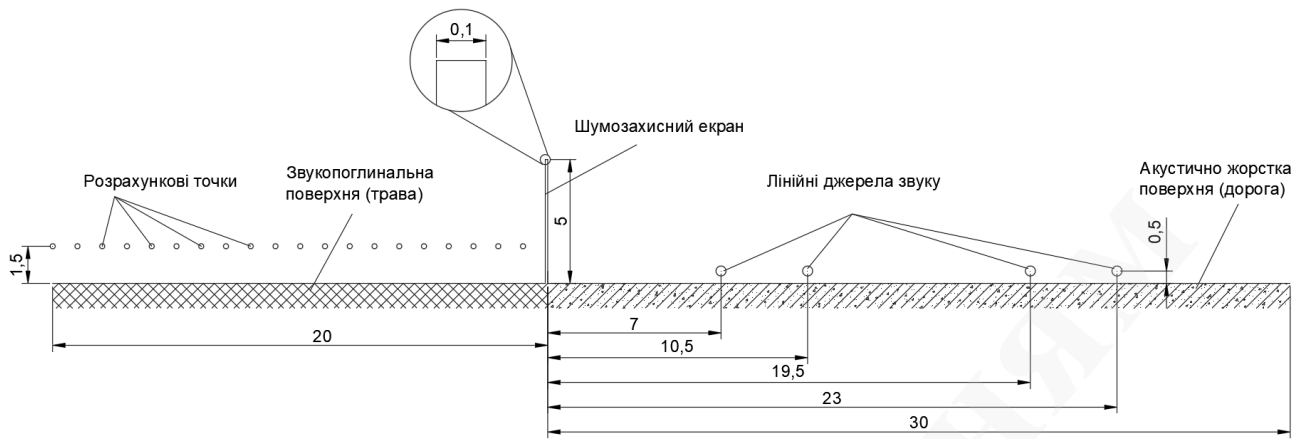
### **6.1. Побудова комп'ютерної моделі**

Наступним кроком була побудована двовимірна геометрія шумозахисного екрану з дорогою та джерелами шуму (рис. 2). Моделі дороги будували на прикладі автомобільних дорог міжнародного значення в Україні, такі як М-06 Київ – Чоп, М-03 Київ-Харків-Довжанський, М-05 Київ – Одеса, для яких було вже виконано кілька проектів шумозахисних екранів. Дорога шириною 30 м, з двома смугами руху та смугою аварійної зупинки в кожен бік.

Відповідно, в комп'ютерній моделі задано 4 лінійних джерела звуку, що відповідають транспортним потокам, які рухаються по кожній смузі руху. Висота джерел звуку – 0,5 м, що відповідає висоті акустичного центру автотранспортного потоку. Висота екрану 5 м, що розташовано на краю дороги з одного боку (рис. 2).

Для кожного джерела звуку задано параметр продуктивності джерела  $Q=0,01 \text{ м}^2/\text{с}$ , що не впливало на результати досліджень, оскільки ефективність екрану в межах лінійної моделі не залежить від рівня звукової енергії, що створюється джерелами звуку.

Дослідження зміни рівнів звуку за екраном проводилося в точках на відстані від 0 до 20 м за екраном (з кроком 0,25 м) та висоті 1,5 м. За екраном моделювалася земельна поверхня з коефіцієнтом звукопоглинання 1 – що відповідає поверхні землі, вкритою травою [18].



**Рис. 2.** Взаємне розташування джерела шуму, екрану та розрахункових точок

Акустично жорсткий шумопоглинальний екран мав розріз прямокутника висотою 5 м та шириною 0,1 м. Така ширина відповідає більшості шумозахисних екранів, побудованих в Україні.

Звукопоглинальні властивості екрану задавалися через параметр вхідного акустичного імпедансу лицьової поверхні екрану. Всі інші поверхні екрану моделювались акустично жорсткими, тобто з нескінченним імпедансом. Такий підхід в акустиці є виправданим, коли акустичний імпеданс перешкоди на три та більше порядків вище, ніж акустичний імпеданс середовища, в якому розповсюджується акустична хвиля.

Коефіцієнт поглинання акустичної хвилі за інтенсивністю вираховувався за відомим співвідношенням:

$$\alpha = \frac{4 \cdot Z_1 \cdot Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2}, \quad (1)$$

де  $Z_1$  – імпеданс середовища, із якого поширюється акустична хвиля;

$Z_2$  – вхідний імпеданс екрану.

Було обрано 4 коефіцієнти поглинання звуку  $\alpha$ , для яких проводились розрахунки (табл. 1).

**Таблиця 1**

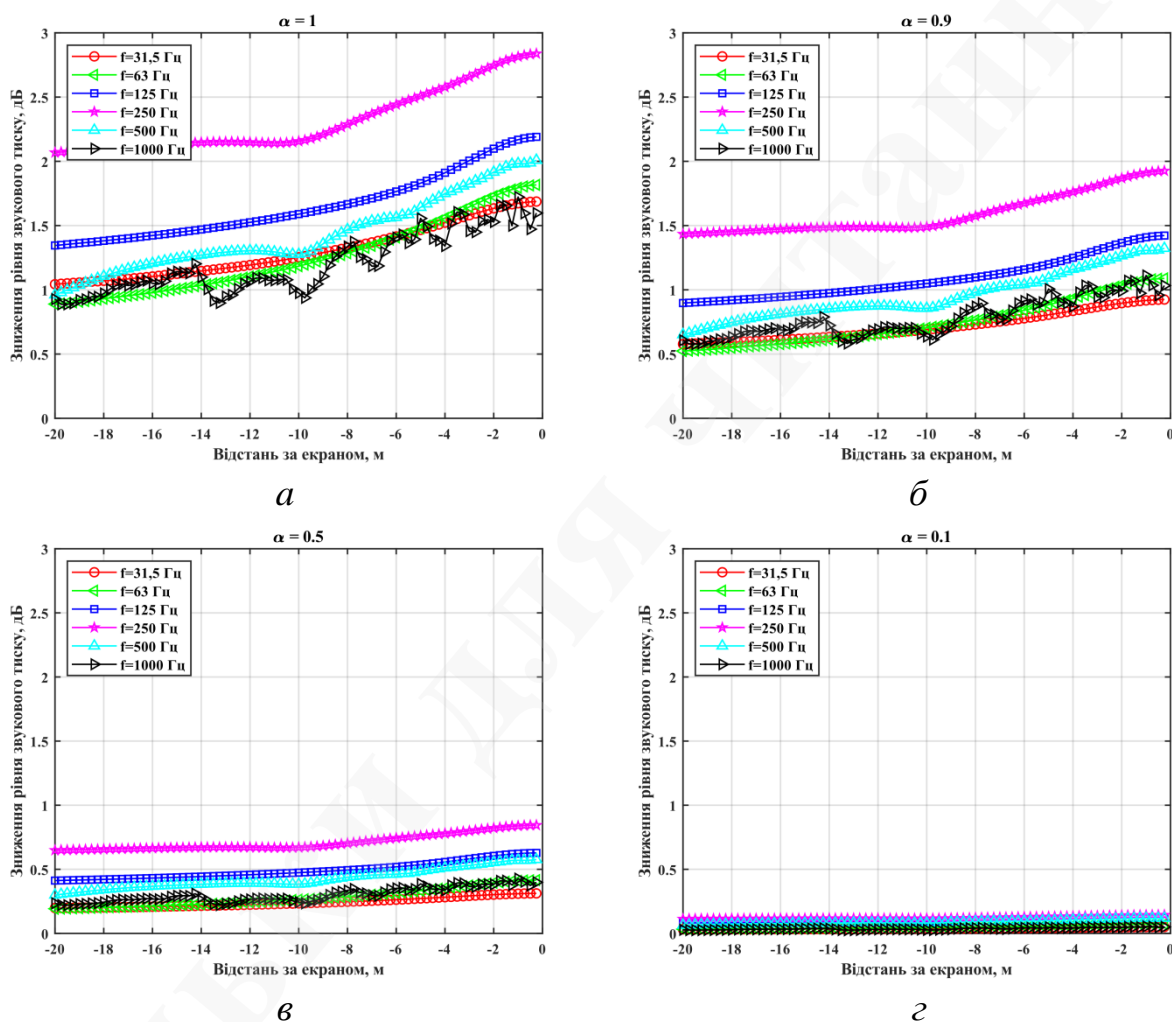
Коефіцієнти звукопоглинання та вхідний акустичний імпеданс екрану

$Z_1, \text{кг}/(\text{м}^2\text{с})$	411,6			
$Z_2, \text{кг}/(\text{м}^2\text{с})$	411,6	792,3	2399,0	15630,0
$\alpha$	1	0,9	0,5	0,1

Для кожного коефіцієнта було побудовано модель екрану та відтворено розподіл акустичних тисків на частотах 31,5 Гц, 63 Гц, 125 Гц, 250 Гц, 500 Гц та 1000 Гц. Проведено порівняння рівнів звукового тиску абсолютно відбиваючого екрану ( $\alpha = 0$ ) та імпедансного екрану з відповідним коефіцієнтом звукопоглинання.

## 6.2. Результати розрахунку

На рис. 3, *a–г* зображено збільшення ефективності шумозахисного екрану при застосуванні до нього звукопоглинаючого матеріалу (тобто різниця рівня звукового тиску при повністю відбиваючій поверхні екрану та звукопоглинальної поверхні екрану).



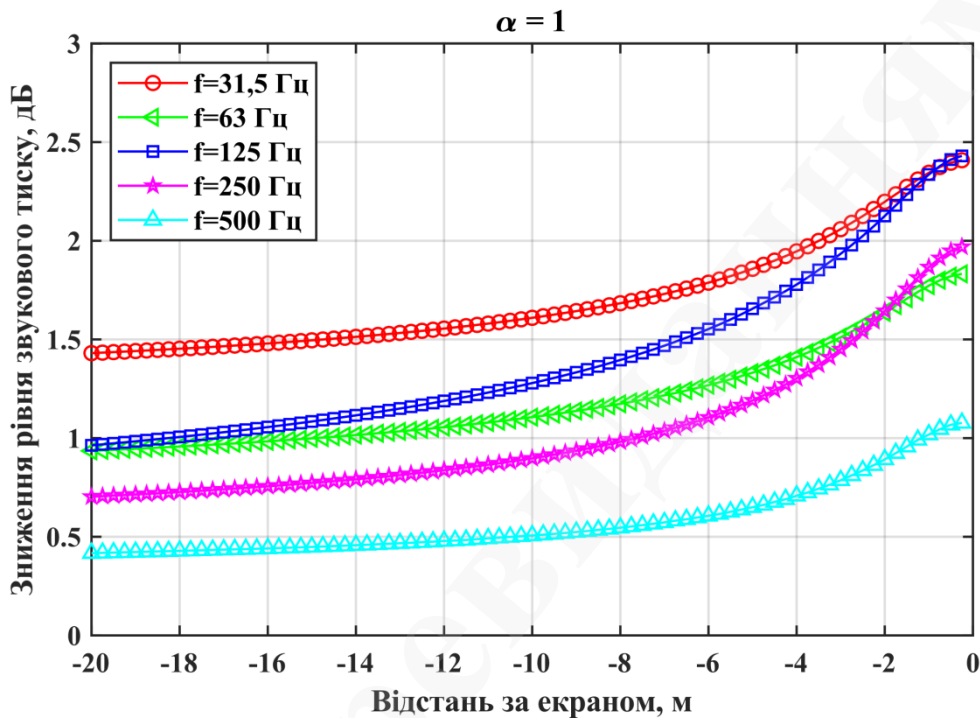
**Рис. 3.** Збільшення ефективності екрану за рахунок звукопоглинання лицьової сторони: *a* –  $\alpha=1,0$ ; *б* –  $\alpha=0,9$ ; *в* –  $\alpha=0,5$ ; *г* –  $\alpha=0,1$

На рис. 3, *a* показане максимальне збільшення ефективності шумозахисного екрану за рахунок звукопоглинання. Як видно, біля екрану ефективність коливається в межах від 1,5 дБ до 3 дБ в залежності від частоти. Зі збільшенням відстані за екраном вплив звукопоглинання на збільшення ефективності екрану зменшується та становить в межах від 1 дБ до 2 дБ.

Зі зменшенням коефіцієнта звукопоглинання (рис. 3, *б–г*) монотонно зменшується й приріст ефективності екрану. І для коефіцієнта звукопоглинання 0,5 приріст ефективності екрану за рахунок звукопоглинального облицювання становить не більше 1 дБ.

### 6.3. Обговорення результатів

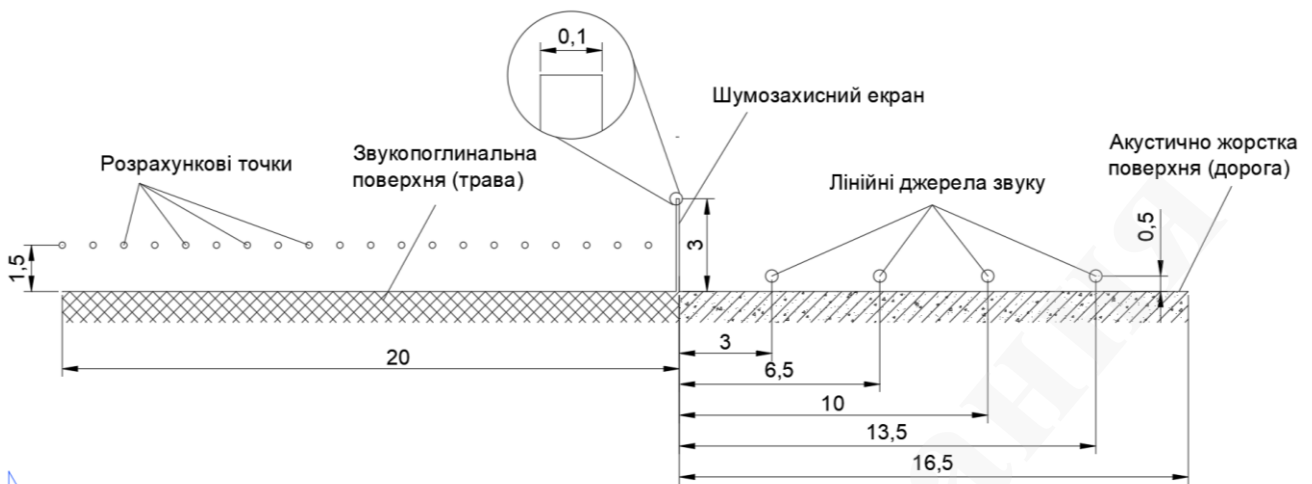
Для оцінки впливу звукопоглинання також було прораховано екран висотою 3 м з аналогічним розташуванням джерел звуку та розрахункових точок (рис. 3). Результати розрахунку збільшення ефективності екрану за рахунок звукопоглинання наведено на рис. 4.



**Рис. 4.** Збільшення ефективності екрану за рахунок звукопоглинання лицьової сторони при висоті екрану 3 м

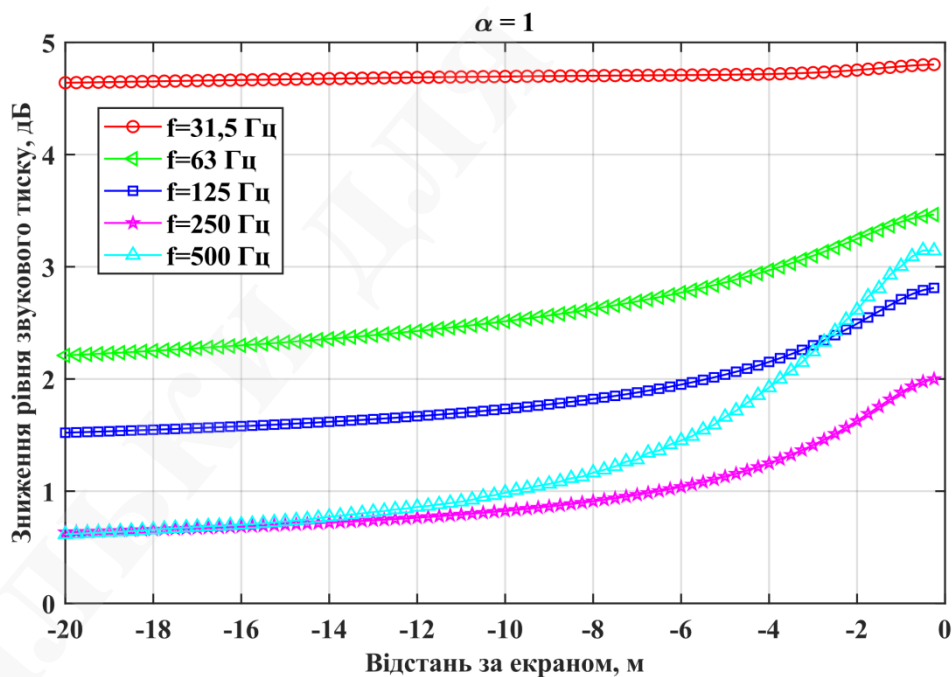
Результати розрахунку показують, що максимальне збільшення ефективності екрану становить 2,5 дБ, що досить добре збігається з результатами наведеними на рис. 3, а. З цього можна зробити висновок, що збільшення ефективності екрану за рахунок звукопоглинання майже не залежить від висоти екрану.

Крім того було прораховано поле навколо екрану при наближенні джерел звуку до екрану (рис. 5).



**Рис. 5.** Взаємне розташування наближених джерел шуму, екрану та розрахункових точок

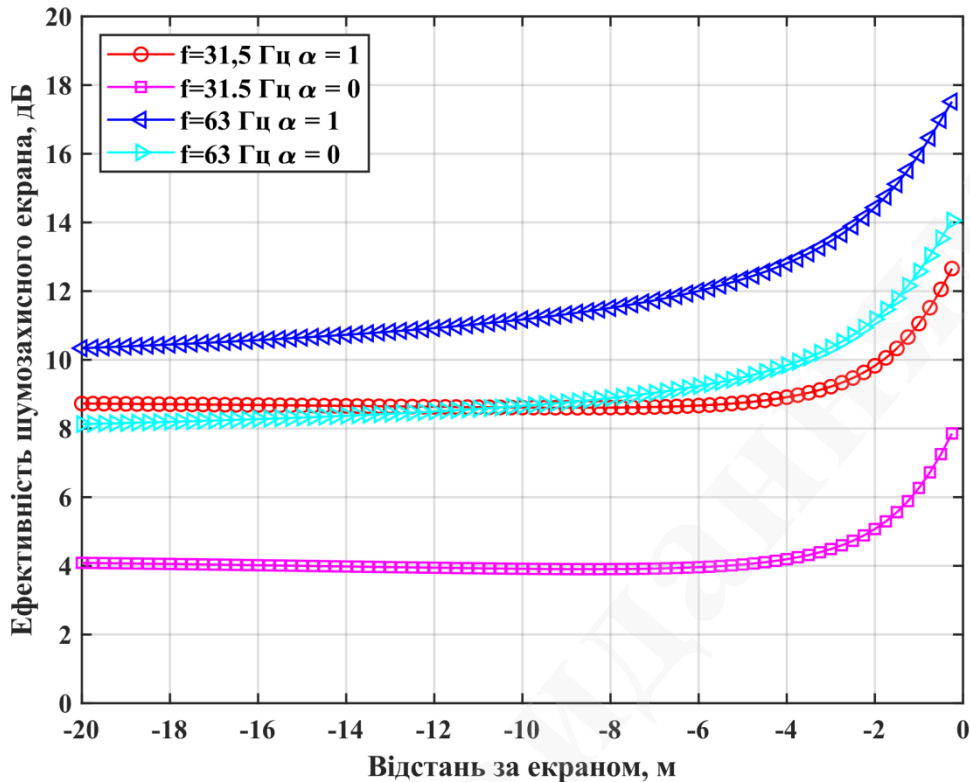
Результати впливу звукопоглинального облицювання екрану на його ефективність наведено на рис. 6.



**Рис. 6.** Збільшення ефективності екрану за рахунок звукопоглинання лицьової сторони при висоті екрану 3 м та наближенні джерел звуку до екрана

Як видно з рис. 6, звукопоглинальне облицювання призвело до збільшення ефективності екрану на величину до 5 дБ. Причому таке збільшення характерне для найнижчої (31,5 Гц) із розглянутих частот. Даний спосіб є досить перспективним оскільки дозволяє збільшувати ефективність екрану на низьких частотах майже вдвічі (рис. 7) за рахунок звукопоглинального облицювання.





**Рис. 7.** Порівняння ефективності акустично жорстких та звукопоглинальних екранів на низьких частотах

За результатами розрахунку можемо побачити, що для точок на відстані понад 10 м ефективність звуковідбивального екрану ( $\alpha=0$ ) на частоті 31,5 Гц становить 4 дБ, а звукопоглинального ( $\alpha=1$ ) більше 8 дБ. Для вищих частот така різниця є менш характерна.

## 7. SWOT-аналіз результатів досліджень

*Strengths.* Проведені дослідження показали, що використання звукопоглинального облицювання шумозахисних екранів дозволяє збільшити їх ефективність. Виявлено, що чим ближче екран розташовано до джерела звуку, тим більший вплив його звукопоглинальних властивостей. Показано, що для низьких частот збільшення ефективності екрану за рахунок звукопоглинання може сягати величини 5 дБ.

*Weaknesses.* До недоліків дослідження слід віднести те, що на даному етапі було проведено лише комп'ютерне моделювання звукового поля довкола звукопоглинального екрана.

*Opportunities.* В подальшому необхідно приділити увагу аналітичному вирішенню задачі знаходження звукового поля довкола імпедансного екрана та провести експериментальні дослідження в натурних умовах чи на фізичних моделях.

Такі дослідження дозволять на практиці довести необхідність застосування звукопоглинання, як фактора збільшення ефективності екранів без зміни їх геометричних розмірів.

*Threats.* Окремо слід приділити увагу питанню захисту звукопоглинальних елементів екрану від атмосферних впливів. Зазвичай для захисту від атмосферних опадів застосовують ПВХ-плівки, однак відомо, що застосування плівок призводить до зменшення коефіцієнта звукопоглинання, тому це питання потребує окремого дослідження.

## **8. Висновки**

1. В результаті проведених досліджень встановлено, що звукопоглинальні властивості шумозахисних екранів суттєво впливають на:

- здатність екрана зменшувати рівні шуму;
- здатність збільшувати ефективність екрана за рахунок звукопоглинання та майже не залежить від висоти самого екрана;
- при наближенні екрана до джерела шуму, фактор звукопоглинання стає більш вагомим для збільшення ефективності екрана.

Створення екранів з високопоглинальними властивостями на низьких частотах є перспективним напрямком збільшення загальної ефективності шумозахисних екранів.

2. Визначено максимально можливе значення збільшення ефективності екрану за рахунок звукопоглинання:

- для доріг міжнародного значення шириною 30 м для екрана висотою 5 м улаштування звукопоглинального облицювання з коефіцієнтом звукопоглинання не нижче 0,9 призводить до збільшення ефективності на величину від 1,0 дБ до 2,5 дБ в залежності від частоти;
- для доріг місцевого значення з шириною не більше 15 м максимальне збільшення ефективності шумозахисного екрану становить 5 дБ.

## **Література**

1. 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: <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.112350>
2. Gieva, E., Ruskova, I., Nedelchev, K., Kralov, I. (2018). An investigation of the influence of the geometrical parameters of a passive traffic noise barrier upon the noise reduction response. *AIP Conference Proceedings*. AIP Publishing LLC, 2048 (1), 020020. doi: <http://doi.org/10.1063/1.5082038>
3. Farina, A., Fausti, P. (1995). *Motorway traffic noise reduction by means of barriers: a design example based on prediction models and experimental verification*. Available at: <http://www.angelfarina.it/Public/Papers/074-ICA95.PDF>
4. Manojkumar, N., Basha, K., Srimuruganandam, B. (2019). Assessment, Prediction and Mapping of Noise Levels in Vellore City, India. *Noise Mapping*, 6 (1), 38–51. doi: <http://doi.org/10.1515/noise-2019-0004>
5. Directive, C. (1988). "89/106/EEC" Council Directive 89/106. EEC of 21 December 1988 on the approximation of laws, regulations and administrative provisions of the Member States relating to construction products. Available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/ALL/?uri=CELEX:31989L0106>

6. Trokhymenko, M. P., Zaiets, V. P. (2010). Vplyv parametriv shumozakhysnykh ekraniv na yikh efektyvnist. *Budivelni materialy, vyroby ta sanitarna tekhnika*, 36, 71–76.
7. Maekawa, Z. (1968). Noise reduction by screens. *Applied Acoustics*, 1 (3), 157–173. doi: [http://doi.org/10.1016/0003-682x\(68\)90020-0](http://doi.org/10.1016/0003-682x(68)90020-0)
8. Jonasson, H. G. (1972). Sound reduction by barriers on the ground. *Journal of Sound and Vibration*, 22 (1), 113–126. doi: [http://doi.org/10.1016/0022-460x\(72\)90849-8](http://doi.org/10.1016/0022-460x(72)90849-8)
9. Hewett, D. P., Langdon, S., Chandler-Wilde, S. N. (2014). A frequency-independent boundary element method for scattering by two-dimensional screens and apertures. *IMA Journal of Numerical Analysis*, 35 (4), 1698–1728. doi: <http://doi.org/10.1093/imanum/dru043>
10. François, S., Schevenels, M., Degrande, G., Borgions, J., Thyssen, B. (2008). A 2.5 D finite element-boundary element model for vibration isolating screens. *Proceedings of ISMA2008 International Conference on Noise and Vibration Engineering*, 5, 2765–2776.
11. Ganesh, M., Morgenstern, C. (2016). High-order FEM–BEM computer models for wave propagation in unbounded and heterogeneous media: Application to time-harmonic acoustic horn problem. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 307, 183–203. doi: <http://doi.org/10.1016/j.cam.2016.02.024>
12. Kouroussis, G., Van Parys, L., Conti, C., Verlinden, O. (2014). Using three-dimensional finite element analysis in time domain to model railway-induced ground vibrations. *Advances in Engineering Software*, 70, 63–76. doi: <http://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2014.01.005>
13. Sun, W., Liu, L., Yuan, H., Su, Q. (2019). Influence of Top Shape on Noise Reduction Effect of High-Speed Railway Noise Barrier. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 493, 012043. doi: <http://doi.org/10.1088/1757-899x/493/1/012043>
14. Monazzam, M. R., Naderzadeh, M., Momen, S., Fard, B. (2012). An optimization process for a T-shaped noise barrier coated by primitive root diffuser equipped with perforated sheets. *Journal of Food, Agriculture & Environment*, 10 (1), 993–996.
15. Hayek, S. I. (1990). Mathematical modeling of absorbent highway noise barriers. *Applied Acoustics*, 31 (1-3), 77–100. doi: [http://doi.org/10.1016/0003-682x\(90\)90054-x](http://doi.org/10.1016/0003-682x(90)90054-x)
16. Ding, L., Van Renterghem, T., Botteldooren, D. (2009). Estimating the effect of semi-transparent traffic noise barrier with ultra weak variational formulation. *8th European conference on Noise Control (Euronoise 2009): Action on noise in Europe*, 1369–1375.
17. Luo, W.-J., Liu, G.-Y. (2017). Study on the Noise Reduction of Sound Absorption Noise Barrier. *Materials Science and Engineering*. doi: [http://doi.org/10.1142/9789813226517\\_0133](http://doi.org/10.1142/9789813226517_0133)
18. ISO 9613-2 (1996). *Attenuation of Sound During Propagation Outdoors—Part 2: A General Method of Calculation*. Geneva: ISO. Available at: <https://www.iso.org/standard/20649.html>