

В. А. Глива, М. С. Кашлев

Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТОНКИХ ШУМОЗАХИСНИХ ЕКРАНІВ В УМОВАХ ОБМЕЖЕНИХ ПРОСТОРІВ

Анотація. Досліджено можливості застосування тонких шумозахисних екранів для зниження акустичного впливу на працюючих і населення в умовах обмежених просторів. Такі умови притаманні будівельному шуму при виконанні робіт серед щільної забудови. Наведено найбільш зручний математичний апарат для прогнозування ефективності акустичного екрана. Виміряні амплітудно-частотні характеристики індексів зниження шуму у залежності від площі акустичного екрана. Встановлено прийнятну збіжність розрахункових і експериментальних даних. Встановлено, що у низькочастотній частині звукового спектра ефективність тонких екранів недостатня. Досліджено вплив отворів у захисній конструкції на індекси зниження шуму. Встановлено, що на середніх та високих частотах отвори стають критичними для захисту від шуму. При цьому на низьких частотах вони практично не впливають на ефективність екрана. Виміряно індекси зниження шуму у октавних смугах частот і їх зміни з відстанню від екрана до приймача звуку. Встановлено, що на низьких частотах рівні звуку можуть зростати (від'ємні індекси) внаслідок інтерференційних явищ. Запропоновано в умовах обмежених просторів надавати екранам резонансних властивостей. За резонансну частоту доцільно обрати частоту звуку з максимальною амплітудою. Для підвищення ефективності екрана в області середніх та високих частот доцільне виготовлення двошарових панелей і заповнення проміжку між шарами шумопоглинальним пористим матеріалом.

Ключові слова: будівельний шум, акустичний екран, індекс зниження шуму, обмежений простір.

Вступ

Тонкі шумозахисні екрани є традиційними засобами зниження акустичного впливу на працюючих і населення. Такі конструкції мають різну форму і габаритні розміри у залежності від умов застосування. Це довгі екрани уздовж транспортних потоків, екрани, які огорожують окремі робочі місця та звукоізолюючі конструкції навколо обладнання з високими рівнями генерованого шуму. Перевагою тонких шумозахисних екранів є відносно низька вартість, простота вироблення та зручність у монтажі. Тому поширеною практикою є застосування мобільних захисних екранів. Але висока ефективність таких конструкцій забезпечується за умови наближеності екрана до джерел звуку та достатньо великих відстаней до приймачів звуку. За інших умов екрануючі конструкції можуть мати низьку ефективність. Наприклад, при виконанні будівельних робіт на території житлової забудови тонкі шумозахисні екрани можуть бути неефективними. Тому доцільно визначити межі ефективності тонких шумозахисних екранів у залежності від їх розмірів, відстаней до захищеної зони тощо. Доцільно визначити можливість зміни індексів зниження шуму внаслідок інтерференційних явищ при відбитті звукових хвиль та дифракції на кромках екрана. Це дозволить обрати найбільш раціональну форму і площу екрана як з функціональних так і економічних міркувань.

Стан питання

Рівні шуму, що впливають на населення регламентуються національними санітарними нормами [1]. Ці норми достатньо жорсткі і відповідають за гранично допустимими значеннями нормативам Євросоюзу. Це вимагає досліджень і розроблення засобів захисту людей від впливу техногенного шуму, зокрема будівельного. Дослідження [2, 3] присвячені саме цій проблематиці. Але вони стосуються впливу на людей буді-

вельного шуму. Робота [4] розглядає моделі поширення будівельного шуму, що використовується у проєктних рішеннях. Такий підхід прийнятний для нової забудови, але виконання робіт на території існуючої забудови стикається з низкою проблем. Головною є неможливість забезпечення нормативних значень шуму існуючої будівельної техніки у оточуючих будівлях. Моніторинг рівнів такого шуму свідчить про його ненормативні значення у побутовому середовищі [5]. Найбільш ефективним засобом зниження акустичного навантаження на населення є застосування звукоізолюючих матеріалів і конструкцій [6, 7]. Але, враховуючи тимчасову потребу у зниженні рівнів шуму конкретного об'єкту будівництва, застосування таких звукопоглинальних матеріалів є проблематичним. Найбільш простими й економічно вигідними є тонкі акустичні екрани, які широко використовуються у виробничих умовах та для зниження шуму транспортний потоків. Ефективність таких екранів досліджено у роботі [8]. Зокрема, надано математичний апарат для оцінки ефективності акустичних екранів. Наведені дослідження стосуються достатньо великих відстаней. При цьому показано, що внаслідок дифракційних явищ на кромках екранів та інтерференції прямих та відбитих хвиль ефективність екрануючої конструкції може знижуватись до незадовільних значень. Найбільш ефективними є поглинаючі та резонансні конструкції [9, 10]. Вони дозволяють отримати високі індекси зниження низькочастотного звуку та інфразвуку. Проте, ці конструкції достатньо складні і мають високу вартість. Їх недоліком є необхідність налаштування на певні частоти у залежності від амплітудно-частотних характеристик шум конкретних джерел. Тому доцільно дослідити межі ефективності тонких шумозахисних екранів в умовах, коли відстані від джерел шуму невеликі, а площі захисних конструкцій обмежені.

Мета роботи – дослідити ефективність шумозахисних екранів у залежності від умов їх застосування.

Викладення основного матеріалу

Необхідність застосування для зниження рівнів шуму у обмежених просторах або розповсюдження – наближеності до житлової забудови обумовлене низьким згасанням шуму у повітрі. У загальному випадку зниження рівнів звукового тиску з відстанню визначається співвідношенням:

- для сферичних акустичних хвиль

$$\Delta L(r) = 20 \lg r,$$

- для циліндричних акустичних хвиль:

$$\Delta L(r) = 10 \lg r.$$

При цьому спостерігається значна залежність згасання від частоти звукової хвилі.

У середньому значення рівня звукового тиску знижується на 6 дБ за подвоєння відстані для сферичних акустичних хвиль та на 3 дБ для циліндричних хвиль. Це обумовлене ефектом дивергенції звуку. У реальних умовах навіть для відстаней 100–500 м відчутний ефект згасання має місце для складових звуку 2000 Гц і вище.

Тобто, для більш конкретних розрахунків:

$$\Delta L(f) = \alpha(f)r,$$

де α – коефіцієнт поглинання звуку у повітрі,
 f – частота звукової хвилі.

Загальновизнаною практикою є визначення α за методикою міжнародної організації цивільної авіації (ICAO). У цій методиці враховується залежність коефіцієнта згасання від відносної вологості та температури повітря.

А це не є суттєвим для будівельних майданчиків, де житлова забудова перебуває на відносно невеликій відстані, а низькочастотна складова будівельного шуму істотна.

Зазвичай акустичні екрани мають прямокутну форму. Для таких конструкцій індекси зниження шуму можна визначити зі співвідношення:

$$\Delta L = -10 \lg \left(\tau + \sum_{i=1}^4 K_{\partial i} + \sum_{n=1}^N K_{en} \right) + 10 \lg \left(1 + \sum_{n=1}^N K_{en} \right),$$

де τ – коефіцієнт звукопровідності матеріалу екрана; $K_{\partial i}$ – коефіцієнт дифракції i -тої кромки екрана; K_{en} – коефіцієнт відбиття n -ї поверхні; N – кількість відбиваючих поверхонь.

Коефіцієнт звукопровідності пов'язаний зі звукоізоляцією R співвідношенням:

$$\tau = 10^{-0,3R}.$$

Цей параметр для більшості стандартних матеріалів є довідковим.

Коефіцієнт дифракції розраховується як:

$$K_{\partial i} = \frac{\gamma_i (10 - 3\varphi\alpha) h}{f \gamma_0 (r_i + l_i - r_0)},$$

де r_0 – відстань від джерела звуку до точки визначення звуку за екраном; r_i – відстань від джерела звуку до відповідної кромки екрана; l_i – відстань від кромки екрана до точки визначення звуку за екраном; α – коефіцієнт звукопоглинання матеріалу екрана, γ_0 ,

γ_i – характеристики спрямованості джерела звуку, які визначаються значенням кута дифракції; φ – кут між векторами R та l .

Параметр h визначається розташуванням екрана, $h = 1$ для відстані від поверхні до нижньої кромки екрана більшої за 1,5 м.

Для точного розрахунку прогнозованої ефективності тонких екранів можна використати співвідношення, наведені у [8].

Було проведено експериментальні дослідження залежності ефективності акустичного екрана від його площі та порівняно результати з розрахунковими даними. Випробування здійснювалися за стандартною процедурою згідно ISO 140 у ревербераційній камері. Результати дослідження наведено на рис. 1.

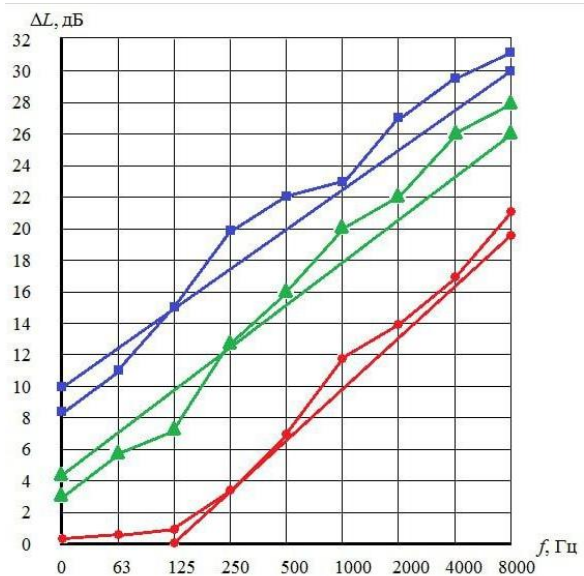


Рис. 1. Залежність індексів зниження шуму від площі тонкого шумозахисного екрана:

— 12 м², — 6 м², — 3 м²,
ламана крива – експеримент, пряма – розрахунок

Усі екрани мали прямокутну форму однакових пропорцій довжини й ширини. Як видно з рис. 1, ефективність екранування очікувано підвищується зі збільшенням площі екрана. В цілому експериментальні дані збігаються з розрахунковими. Розбіжності можна пояснити похибкою вимірювальної апаратури та неврахованими акустичними ефектами.

У багатьох випадках шумозахисні конструкції мають технологічні опори. Найбільш це стосується виробів подвійного призначення – парканів, огорожувальних конструкцій тощо. Було досліджено ефективність тонкої захисної конструкції суцільної структури та кількома отворами (рис. 2).

Як видно з рис. 2, наявність отворів знижує ефективність захисту. При цьому це зниження зростає з підвищенням частот звукових хвиль. У практичній роботі слід враховувати, що суцільні тонкі екрани мають низьку ефективність у низькочастотній області звукового спектра. В той же час, як показано у [10], можна розраховувати параметри отворів, які забезпечують підвищення звукопоглинання низькочастотної складової шуму.

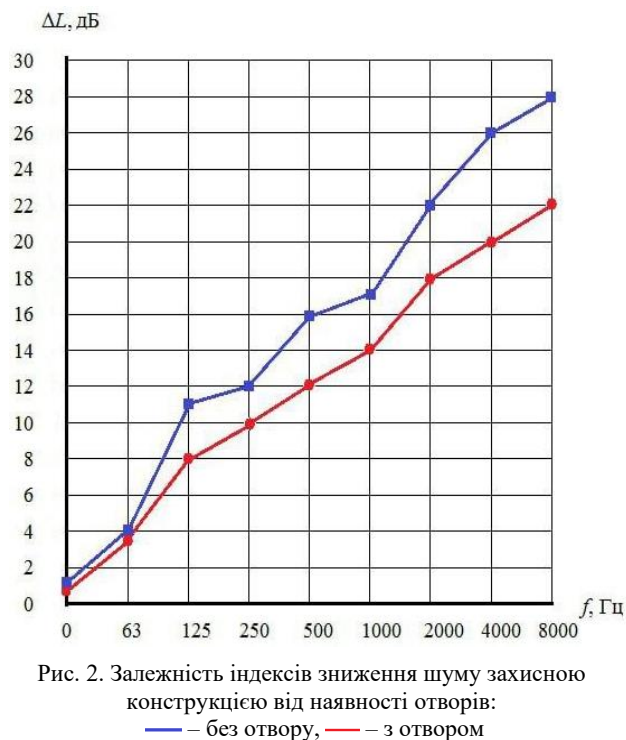


Рис. 2. Залежність індексів зниження шуму захисною конструкцією від наявності отворів:
— без отвору, — з отвором

Як зазначалося, в умовах обмежених просторів критичною є відстань від шумозахисного екрана до приймача звуку. Було визначено індекси зниження шуму у октавних смугах частот у залежності від відстані приймача до тонкого екрана (табл. 1).

Отримані дані свідчать, що у низькочастотній області звукового спектра у захищеній зоні відбувається підсилення шуму. Це обумовлене інтерференційними явищами, що може мати негативні наслідки для людей. Натурні вимірювання свідчать, що дані наведені у таблиці 1 не є характерними й не можуть розглядатися як узагальнені. У залежності від габаритних розмірів екрана частоти підсилення звуку або його зниження змінюються. Загальною тенденцією є збільшення ефективності екрана та зниження ефекту підвищення шуму у певних смугах. Найбільше значення для прояви інтерференції мають імпедансні характеристики відбивальних поверхонь. За сталих розмірів екранів, виготовлених з одного матеріалу на різних підстилаючих поверхнях ефект відбиття складає 5–7 дБ у низькочастотній області. Тобто, при визначенні розмірів й позиціонування захисної конструкції необхідно врахувати наявність і показники усіх відбиваючих поверхонь.

Таблиця 1 – Залежність індексу зниження шуму від відстані до тонкого екрана

l, м	ΔL, дБ							
	31	63	125	250	500	1000	2000	4000
10	10	5	-8	-5	0	10	8	8
20	8	0	-7	-5	2	8	10	12
30	0	0	-7	-2	5	8	10	12
40	0	-2	-8	-2	4	7	5	10
50	-2	-4	-15	0	2	6	5	8
60	-2	-5	-15	-2	2	4	5	7

У практичній роботі проектування екранів під конкретний будівельний майданчик недоцільно. Це пояснюється тим, що відновлювальні роботи та реконструкція ушкоджених будівель тимчасові. Тому для даного виду діяльності доцільно створити більш-менш універсальний захисний екран прийнятної ефективності у низькочастотній області звукового спектра та високої ефективності для середніх і високих частот.

Відомо, що низькочастотний шум є значною складовою будівельного шуму. Тому для отримання прийнятних еквівалентних значень зниження шуму будівельної техніки захисні конструкції повинні бути комбінованими.

Усі захисні екрани мають кінцеві розміри, тому уникнути дифракційних явищ на кромках екранів практично неможливо. Необхідно максимально знизити проходження звуку крізь матеріал екрана, у тому числі й за рахунок резонансних явищ. Найбільш раціональним є обирання масогабаритних параметрів екранів із забезпеченням максимального поглинання звуку частоти максимальної амплітуди. При цьому

один з боків конструкції або проміжок між двома поверхнями доцільно заповнювати шумопоглинальним матеріалом, наприклад, базальтовими волокнами. Це забезпечить прийнятні індекси зниження шуму у низькочастотній області звукового спектра.

Висновки

1. Визначено найбільш прийнятний у практичній діяльності математичний апарат для прогнозування захисних властивостей тонких акустичних екранів. Встановлено прийнятну збіжність розрахункових даних з експериментом. Отримано залежності індекса зниження шуму від площі акустичного екрана.

2. Проведено порівняння індексів зниження шуму суцільним екраном та екраном з отворами. Встановлено, що на середніх та високих частотах наявність отворів суттєво знижує ефективність захисного екрана. При цьому ефективність захисту у низькочастотній області звукового спектра незадовільна.

3. Показано, що на низьких частотах тонкий екран може підсилити шум внаслідок інтерференційних явищ (від'ємні індекси зниження шуму). Для уникнення такого ефекту доцільно проєктувати захисні конструкції, налаштовані на резонансну частоту, якою є частота звуку найбільшої амплітуди.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. ДСН допустимих рівнів шуму в приміщеннях житлових та громадських будинків і на території житлової забудови. Наказ Міністерства охорони здоров'я України 22 лютого 2019 року № 463
2. Mostafa Mir, Farnad Nasirzadeh, SangHyun Lee, Densil Cabrera, Anthony Mills. Construction noise management: A systematic review and directions for future research, *Applied Acoustics*, V. 197, 2022, 108936, <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2022.108936>
3. Seulbi Lee, Sungjoo Hwang, Meesung Lee, Sungchan Lee. The impact of different types and levels of construction noise on physiological responses: Focusing on standardization and habituation, *Sustainable Cities and Society*, V. 112, 2024, 105644, <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105644>
4. Jantien Stoter, Ravi Peters, Tom Commandeur, Balázs Dukai, Kavisha Kumar, Hugo Ledoux. Automated reconstruction of 3D input data for noise simulation. *Computers, Environment and Urban Systems*, V 80, 2020, 101424, <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2019.101424>
5. Bhan Lam, Woon-Seng Gan, DongYuan Shi, Masaharu Nishimura, Stephen Elliott. Ten questions concerning active noise control in the built environment. *Building and Environment*, V.200, 2021, 107928, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107928>
6. E. Jayamani, M.K.B. Bakri, Lignocellulosic fibres reinforced polymer composites for acoustical applications. In: Kalia, S. (ed.) *Lignocellulosic Composite Materials*, pp. 415-444. Springer, Berlin (2018)
7. E. Taban, A. Tajpoor, M. Faridan et al. Acoustic Absorption Characterization and Prediction of Natural Coir Fibers. *Acoust Aust* 47, 67–77 (2019). <https://doi.org/10.1007/s40857-019-00151-8>
8. Шевченко Ю. С. Розробка моделей оцінки та підвищення ефективності зниження шуму транспортних потоків: дис. к.т.н., 21.06.01, Київ, 2016, 236 с.
9. V. Glyva, O. Zaporozhets, L. Levchenko, N. Burdeina, V. Nazarenko. Methodological Foundations Protective Structures Development For Shielding Electromagnetic And Acoustic Fields. *Strength of Materials and Theory of Structures* 110, 2023, PP. 245-255. <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2023.110.245-255>
10. Glyva, V., Gusev, V., Biruk, Y., & Kashlev, M. (2024). Засади зниження рівнів низькочастотного звуку та інфразвуку у виробничих та побутових умовах. Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць, 1(75), 170-173. <https://doi.org/https://doi.org/10.26906/SUNZ.2024.1.170>

Received (Надійшла) 25.07.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 22.10.2025

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Глива Валентин Анатолійович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри фізики, Київський національний університет будівництва та архітектури, Київ, Україна;

Valentyn Glyva – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Physics, Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine;

e-mail: hlyva.va@knuba.edu.ua, ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0003-1257-3351>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57210185162>.

Кашлев Михайло Сергійович – аспірант кафедри технологій захисту навколишнього середовища та охорони праці, Київський національний університет будівництва та архітектури, Київ, Україна;

Mykhailo Kashlev – PhD student at the Department of Environmental Protection Technologies and Labour Protection, Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine;

e-mail: kashlev_ms-2022@knuba.edu.ua; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0009-0004-6240-4630>.

**Research on the effectiveness
of thin noise barriers in confined spaces**

Valentyn Glyva, Mykhailo Kashlev

Abstract. The possibilities of using thin noise barriers to reduce acoustic impact on workers and the population in confined spaces have been investigated. Such conditions are typical for construction noise when working in densely built-up areas. The most convenient mathematical apparatus for predicting the effectiveness of an acoustic screen is presented. The measured amplitude-frequency characteristics of noise reduction indices depending on the area of the acoustic screen are given. An acceptable convergence of calculated and experimental data has been established. It has been established that thin screens are insufficiently effective in the low-frequency part of the sound spectrum. The influence of openings in the protective structure on noise reduction indices has been investigated. It has been established that at medium and high frequencies, openings become critical for noise protection. At the same time, at low frequencies, they have practically no effect on the effectiveness of the screen. Noise reduction indices in octave frequency bands and their changes with distance from the screen to the sound receiver were measured. It was found that at low frequencies, sound levels can increase (negative indices) due to interference phenomena. It is proposed to give screens resonant properties in confined spaces. It is advisable to choose the sound frequency with the maximum amplitude as the resonant frequency. To increase the effectiveness of the screen in the mid and high frequency ranges, it is advisable to manufacture two-layer panels and fill the gap between the layers with noise-absorbing porous material.

Keywords: construction noise, acoustic screen, noise reduction index, limited space.