

Київський національний університет будівництва і архітектури  
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова праця  
на правах рукопису

**КАШЛЕВ МИХАЙЛО СЕРГІЙОВИЧ**

УДК 629.5.015.5-6:331.45

**ДИСЕРТАЦІЯ**

**ЗАСОБИ ЗНИЖЕННЯ БУДІВЕЛЬНОГО ШУМУ ПРИ ВІДНОВЛЕННІ ТА  
РЕКОНСТРУКЦІЇ БУДІВЕЛЬ І СПОРУД**

263 – Цивільна безпека

26 – Цивільна безпека

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії вперше

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

\_\_\_\_\_ М.С. Кашлев

Науковий керівник: Глива Валентин Анатолійович  
доктор технічних наук, професор

Київ – 2026

## АНОТАЦІЯ

Кашлев М.С. Засоби зниження будівельного шуму при відновленні та реконструкції будівель і споруд. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 26 – «Цивільна безпека», за спеціальністю 263 – «Цивільна безпека» – Київський національний університет будівництва і архітектури, МОН України, Київ, 2026.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуального науково-практичного завдання зниження впливу будівельного шуму на працюючих і населення при виконанні відновлювальних будівельних робіт в умовах щільної житлової забудови.

Проаналізовано наукові публікації та прикладні розробки щодо захисту працюючих і населення від впливу шуму техногенного походження, у тому числі й інфразвуку. Показано, що в умовах наближеності місць постійного або тимчасового перебування людей до джерел шуму, традиційні засоби захисту від акустичних впливів – акустичні екрани недостатньо ефективні. В умовах обмежених просторів тонкі акустичні екрани, у залежності від параметрів імпедансних поверхонь, можуть підвищувати рівні шуму внаслідок інтерференційних явищ. Особливо це стосується низькочастотної області звукового спектра. При цьому внаслідок відбиття та перевідбиття акустичних хвиль будівельні конструкції не забезпечують нормативних значень звукоізоляції.

Досліджено фактичні значення широкосмугового шуму типової будівельної техніки та будівельних майданчиків. Показано, що значна частина такого шуму припадає на низькочастотну частину звукового спектра та інфразвуку, які мають малі коефіцієнти згасання у повітрі і будівельних та екрануючих матеріалах.

Розроблено загальні засади проєктування конструкцій для зниження рівнів низькочастотного звуку та інфразвуку.

Розроблено математичний апарат для проєктування резонансних панелей для поглинання звукових та інфразвукових коливань. На відміну від існуючих рішень,

проектування спирається на неперервні спектральні значення звуку, що дозволяє обирати за резонансні частоти звуку та інфразвуку максимальних амплітуд. При цьому розрахунки здійснюються з використанням параметрів матеріалів, які є довідковими – пружні модулі, густина тощо. Теоретично обґрунтовано і експериментально підтверджено підвищення ефективності звукопоглинальних панелей з нерегулярним розташуванням перфорації певних розмірів.

Вдосконалено модель Delany-Bazley щодо коефіцієнта поглинання звуку пористими матеріалами. Усі розрахунки з прийнятною похибкою зведено до одного параметра – питомому опорі повітряному потоку, який легко вимірюється в імпедансній трубі. Усі розрахунки здійснюються у дійсній формі, що спрощує практичне застосування моделі. Верифікація результатів теоретичних досліджень за допомогою натурних вимірювань показала прийнятну збіжність розрахункових та експериментальних даних. Зокрема встановлено, що розроблений пористий матеріал на основі базальтових волокон забезпечує коефіцієнти шумопоглинання у низькочастотній області звукового спектра до 0,45–0,50. Для середніх і високих частот – 0,75–0,90. Показано можливість розширення функціональних можливостей шумопоглинальних матеріалів, наприклад, для екранування електромагнітних полів широкого частотного діапазону.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у наступному:

*Вперше:* обґрунтовано засади проектування широкосмугових звукопоглинальних конструкцій, що дозволило забезпечити індекси зниження звуку у низькочастотній частині звукового спектра 5–8 дБ, у середньо- та високочастотній області – 25–35 дБ.

*Вдосконалено:* існуючі моделі поглинання звуку пористими середовищами шляхом визначення відповідних коефіцієнтів через опір продуванню та здійснення розрахунків у дійсній формі.

*Набули подальшого розвитку:* розрахункові методи прогнозування ефективності шумозахисних екранів застосуванням, на відміну від існуючих методів, параметрів матеріалів, які є довідковими. Це дозволило зменшити обсяги

експериментальних досліджень з випробування ефективності захисних конструкцій та отримання вихідних даних.

Практичне значення одержаних результатів полягає у наступному:

Вдосконалений розрахунковий апарат дозволяє здійснювати прогнозування захисних властивостей матеріалів і конструкцій у залежності від амплітудно-частотних характеристик звуку та інфразвуку та умов їх застосування фахівцями-практиками без спеціальної підготовки. У розрахунки закладено використання довідкових параметрів матеріалів з мінімальною кількістю даних, які отримуються експериментально у лабораторних умовах. Визначені засади проектування конструкцій дозволяють у практичній роботі нормалізувати рівні шуму та інфразвуку у залежності від їх інтенсивності, розташування шумозахисних конструкцій тощо. Випробування захисних конструкцій у реальних умовах експлуатації свідчить про їх достатню ефективність. Результати досліджень впроваджено у навчальний процес Київського національного університету будівництва і архітектури при підготовці фахівців з цивільної безпеки та технології захисту навколишнього середовища.

**Ключові слова:** будівельний шум, щільна забудова, індекс зниження шуму, акустичний екран, резонансна панель.

## ABSTRACT

*Kashlev M.S.* Means of reducing construction noise during the restoration and reconstruction of buildings and structures. – Qualification scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in the field of knowledge 26 – "Civil Security", specialty 263 – "Civil Security" Kyiv National University of Civil Engineering and Architecture, Kyiv, 2026.

The dissertation is devoted to solving the urgent scientific and practical problem of reducing the impact of construction noise on workers and the population during restoration work in densely populated residential areas.

Scientific publications and applied developments regarding the protection of workers and the general public from the effects of man-made noise, including infrasound, have been analysed. It has been shown that in conditions where places of permanent or temporary human habitation are located close to noise sources, traditional means of protection against acoustic effects – acoustic screens – are insufficiently effective. In confined spaces, thin acoustic screens, depending on the parameters of the impedance surfaces, can increase noise levels due to interference phenomena. This is particularly true in the low-frequency region of the sound spectrum. Furthermore, due to the reflection and re-reflection of acoustic waves, building structures do not meet the standard sound insulation requirements.

The actual values of broadband noise from typical construction machinery and construction sites have been investigated. It has been shown that a significant proportion of such noise falls within the low-frequency part of the sound spectrum and infrasound, which have low attenuation coefficients in air and in building and screening materials.

General principles for the design of structures to reduce low-frequency sound and infrasound levels have been developed.

A mathematical framework has been developed for the design of resonant panels to absorb sound and infrasound vibrations. Unlike existing solutions, the design is based on continuous spectral values of sound, which allows the selection of resonance frequencies for sound and infrasound of maximum amplitudes. In this case, calculations are performed using reference material parameters – elastic moduli, density, etc. The increased efficiency of sound-absorbing panels with irregularly arranged perforations of specific sizes has been theoretically substantiated and experimentally confirmed.

The Delany-Bazley model regarding the sound absorption coefficient of porous materials has been improved. All calculations, with an acceptable margin of error, are reduced to a single parameter – the specific resistance to air flow, which is easily measured in an impedance tube. All calculations are performed in real form, which simplifies the practical application of the model. Verification of the theoretical results using field measurements showed acceptable agreement between the calculated and

experimental data. In particular, it was established that the developed porous material based on basalt fibres provides sound absorption coefficients in the low-frequency region of the sound spectrum of up to 0.45–0.50. For mid and high frequencies – 0.75–0.90. The possibility of expanding the functional capabilities of sound-absorbing materials has been demonstrated, for example, for shielding electromagnetic fields across a wide frequency range.

The scientific novelty of the results obtained lies in the following:

For the first time: the principles of designing broadband sound-absorbing structures have been substantiated, enabling sound reduction indices of 5–8 dB in the low-frequency part of the sound spectrum and 25–35 dB in the mid- and high-frequency regions.

Existing models of sound absorption by porous media have been improved by determining the relevant coefficients based on airflow resistance and performing calculations in real form.

Further development has been achieved in: calculation methods for predicting the effectiveness of noise barriers by using, unlike existing methods, material parameters that are reference values. This has made it possible to reduce the scope of experimental studies on testing the effectiveness of protective structures and obtaining initial data.

The practical significance of the results obtained lies in the following:

The improved calculation framework enables the prediction of the protective properties of materials and structures depending on the amplitude-frequency characteristics of sound and infrasound and the conditions of their application by practitioners without specialised training. The calculations are based on the use of reference material parameters with a minimum amount of data obtained experimentally under laboratory conditions. The established principles of structural design allow for the normalisation of noise and infrasound levels in practical work, depending on their intensity, the location of noise-protective structures, and so on. Tests of protective structures under real operating conditions demonstrate their sufficient effectiveness. The research findings have been incorporated into the curriculum of Kyiv National University

of Construction and Architecture in the training of specialists in civil safety and environmental protection technology.

**Keywords:** construction noise, dense development, noise reduction index, acoustic screen, resonant panel.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

*Статті у наукових виданнях, що включені до міжнародних наукометричних баз (Scopus)*

1. N. Burdeina, V. Glyva, L. Levchenko, G. Krasnianskyi, Y. Biruk, S. Zozulya, L. Zozulya, M. Kashlev, T. Grzelakowski. (2025). Innovative Approaches to Designing Sound Insulation in Historic Buildings during Reconstruction. *International Journal of Conservation Science*, Volume 16, Special Issue. pp. 373-382, DOI: 10.36868/IJCS.2025.si.01

*Статті у наукових фахових виданнях України*

2. 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>

3. Glyva, V., Kashlev, M., Tkachuk, K. 2024. Дослідження рівнів шуму при реконструкції й відновленні будівель і визначення заходів його зниження. Системи управління, навігації та зв'язку. *Збірник наукових праць*. 4, 78 (Лис 2024), 184-186 <https://doi.org/https://doi.org/10.26906/SUNZ.2024.4.184>

4. Глива В. А., Кашлев М. С. Екранування шуму будівельного обладнання. Системи управління, навігації та зв'язку. *Збірник наукових праць*. 2(80), 2025, с 222-225, doi: 10.26906/SUNZ.2025.1.222-225

5. Глива В. А., Кашлев М. С. 2025. Дослідження ефективності тонких шумозахисних екранів в умовах обмежених просторів. Системи управління,

навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. 4 (82), с. 160-163, doi: 10.26906/SUNZ.2025.4.160-163

*Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації*

6. Глива В.А., Левченко Л.О., Кашлев М.С. Моніторинг інфразвукового навантаження на території, прилеглі до об'єктів енергетики. Екологія. Ресурси. Енергія: тези доп. міжнар. наук.-прак. конференції, м. Київ, 22-24 листопада 2023 р. Київ, 2023. с. 112-113 [https://www.knuba.edu.ua/wp-content/uploads/2023/11/jere\\_2023\\_program\\_tezy.pdf](https://www.knuba.edu.ua/wp-content/uploads/2023/11/jere_2023_program_tezy.pdf)

7. V. Glyva, S. Zozulya, M. Kashlev. Investigation of the spectral composition of construction machinery noise and development of a methodology for improving the effectiveness of protective equipment. REPORTS of the 5th INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND PRACTICAL CONFERENCE ENERGY. RESOURCES. ECOLOGY, November 27-29, 2024, KYIV, p. 106.

8. Grygorii Krasnianskyi, Oleg Besarab, Mykhailo Kashlev, Denys Khomenko. Prediction of sound absorption characteristics of porous materials. REPORTS of the 6th INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND PRACTICAL CONFERENCE ENERGY. RESOURCES. ECOLOGY, December 3-5, 2025, KYIV, p. 86-87.

## ЗМІСТ

ГЛОСАРІЙ.....	11
<b>ВСТУП.....</b>	<b>13</b>
<b>РОЗДІЛ 1. НОРМАТИВНА БАЗА ТА ІСНУЮЧІ ПІДХОДИ ДО ЗНИЖЕННЯ ШУМУ ТА ІНФРАЗВУКУ.....</b>	<b>17</b>
1.1. Шум та інфразвук техногенного походження як чинники негативного впливу на людей.....	17
1.2. Аналіз чинної національної та міжнародної нормативних баз з гранично допустимих рівнів та вимірювання шуму та інфразвуку.....	18
1.3. Існуючі засоби зниження рівнів шуму та інфразвуку у виробничих та побутових умовах .....	23
Висновки до розділу 1.....	34
<b>РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ І МЕТОДИКИ ВИМІРЮВАННЯ РІВНІВ ШУМУ ТА ІНФРАЗВУКУ І ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТЕЙ ЗАХИСНИХ МАТЕРІАЛІВ І КОНСТРУКЦІЙ.....</b>	<b>35</b>
2.1. Особливості визначення кількісних значень низькочастотного звуку та інфразвуку .....	35
2.2. Методи і обладнання вимірювання кількісних значень шуму та інфразвуку .....	37
2.3. Розрахункові методи визначення та прогнозування рівнів шуму та ефективності шумозахисних конструкцій.....	38
Висновки до розділу 2.....	43
<b>РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ РІВНІВ ШУМУ ТА ІНФРАЗВУКУ БУДІВЕЛЬНОЇ ТЕХНІКИ ТА ВИЗНАЧЕННЯ УМОВ ЇХ МІНІМІЗАЦІЇ.....</b>	<b>45</b>
3.1. Дослідження рівнів шуму та інфразвуку на будівельних майданчиках в умовах щільної забудови.....	45

3.2. Розроблення та визначення ефективності засобів зниження рівнів будівельного шуму та інфразвуку.....	54
3.3. Засоби прогнозування ефективності матеріалів і конструкцій для зниження рівнів шуму та інфразвуку.....	68
Висновки до розділу 3.....	82
<b>РОЗДІЛ 4. ПЛАНУВАННЯ ТА ВПРОВАДЖЕННЯ ОРГАНІЗАЦІЙНО-ТЕХНІЧНИХ ЗАХОДІВ ЗІ ЗНИЖЕННЯ ВПЛИВУ БУДІВЕЛЬНОГО ШУМУ ТА ІНФРАЗВУКУ НА ПРАЦЮЮЧИХ ТА НАСЕЛЕННЯ.....</b>	<b>85</b>
4.1. Зниження рівнів шуму та інфразвуку як складова організаційно-технічних заходів з нормалізації рівнів фізичних чинників техногенного походження.....	85
4.2. Порядок розроблення та впровадження матеріалів і конструкцій для нормалізації рівнів шуму та інфразвуку в умовах щільної забудови.....	86
4.3. Результати випробувань ефективності матеріалів і захисних конструкцій у реальних умовах експлуатації.....	97
Висновки до розділу 4.....	98
<b>ВИСНОВКИ.....</b>	<b>100</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....</b>	<b>103</b>
<b>ДОДАТОК А.....</b>	<b>116</b>
<b>ДОДАТОК Б.....</b>	<b>118</b>
<b>ДОДАТОК В.....</b>	<b>120</b>

## ГЛОСАРІЙ

<b>Звук</b>	пружні хвилі, які розповсюджуються у пружному середовищі, викликані будь-яким джерелом (20 кГц).
<b>Інфразвук</b>	коливання з частотами нижче 20 Гц.
<b>Звукове поле</b>	область середовища, де розповсюджуються звукові хвилі.
<b>Звуковий тиск</b>	зміна тиску у будь-якій точці середовища, порівняно з атмосферним, що викликано деформацією розрідження та стиснення у звуковому полі.
<b>Повітряний звук</b>	складова звукового поля, яка обумовлена передачею звуку від джерела до точки спостереження крізь повітря або крізь огорожуючі конструкції.
<b>Структурний звук</b>	складова звукового поля, обумовлена випромінюванням шуму вібруючими конструкціями.
<b>Швидкість розповсюдження звуку</b>	залежить від характеристик середовища, у якому він розповсюджується. Швидкість звуку є функцією густини і пружності середовища, а для газоподібного середовища – температури. За нормальних умов швидкість звуку в повітрі – 340–344 м/с.
<b>Звуковий промінь</b>	напрямок розповсюдження звукових хвиль.
<b>Фронт звукової хвилі</b>	поверхня, яка з'єднує суміжні точки поля з однаковою фазою коливань. Існують три типи звукових хвиль – плоскі, сферичні та циліндричні.
<b>Питомий акустичний опір</b>	добуток густини розповсюдження звукових хвиль та швидкості їх розповсюдження.
<b>Інтенсивність звуку</b>	відношення квадрата звукового тиску до питомого акустичного опору середовища

<b>Звукова потужність</b>	добуток інтенсивності звуку і площі фронту звукової хвилі
<b>Шум</b>	випадкова комбінація звуків різної інтенсивності та частоти – небажаний звук. Небажаний звук – звук техногенного походження.
<b>Низькочастотний шум</b>	шум з максимальними амплітудами звуку у звуковому спектрі 250 – 300 Гц.
<b>Середньочастотний звук</b>	шум з максимальними амплітудами звуку у звуковому спектрі до 300 – 800 Гц.
<b>Високочастотний звук</b>	шум з максимальними амплітудами звуку у звуковому спектрі понад 800 Гц.
<b>Октавні смуги частот</b>	смуги зі середньгеометричними частотами від 31,5 до 8000 Гц з подвоєнням частоти попередньої смуги.
<b>Звукоізоляція</b>	фізичний процес проходження звуку крізь перешкоду. Чисельно визначається відношенням потоку енергії, що падає на перешкоду до потоку енергії, що проходить крізь неї.
<b>Акустичний імпеданс</b>	комплексний акустичний опір, який чинить середовище на поширення звукових хвиль. Для нормальних умов для повітря складає 415 Па*с/м.
<b>Шкала корекції «А»</b>	спеціальний фільтр, що використовується при вимірюванні шуму для того, щоб врахувати особливості слухового сприйняття людини. Застосовується для вимірювання звуку. Рівні інфразвуку вимірюються за лінійною шкалою.

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Шум техногенного походження є вагомим фізичним чинником негативного впливу на працюючих і населення. Тому зниженню рівнів шуму приділяється багато досліджень й прикладних розробок. Одним з джерел техногенного шуму є будівельний шум. Головним його джерелом є шум будівельної й транспортної техніки та шум, який генерується при виконанні будівельних робіт. В Україні внаслідок бойових дій та терористичних атак значна частина будівель і споруд пошкоджена й перебуває в місцях щільної забудови. Тому застосування традиційних методів зниження шуму – захист відстанню не є ефективним. Крім того, при виконанні термінових робіт не завжди можливо обмеження часу їх виконання (захист часом). Наближеність житлової забудови до будівельних майданчиків ускладнює застосування стандартних шумозахисних конструкцій внаслідок відбиття та перевідбиття акустичних хвиль. А згасання енергії звукових хвиль у повітрі незначне. Тому потребують дослідження фактичні значення будівельного шуму на малих відстанях й розроблення адекватних засобів його зниження з урахуванням дифракційних та інтерференційних явищ при його розповсюдженні. В останні роки в усьому світі й Україні багато уваги приділяється зниженню рівнів низькочастотного звуку та інфразвуку, які практично не поглинаються у повітрі та будівельними конструкціями. Більшість таких досліджень стосується вітрових турбін та транспортних потоків. Рівні низькочастотного звуку та інфразвуку з боку об'єктів будівництва практично не досліджено, що вимагає проведення відповідного моніторингу й розроблення засобів захисту з урахуванням амплітудно-частотних характеристик низькочастотного звуку та інфразвуку. Це вимагає вдосконалення існуючих співвідношень для прогнозування поглинальних властивостей шумозахисних матеріалів та резонансних конструкцій, що спрощує процеси розроблення й впровадження засобів захисту від впливу звукових та інфразвукових хвиль техногенного походження. Наведене обумовлює тему дисертаційного дослідження як актуального науково-прикладного завдання.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Робота виконана відповідно до «Концепції реформування системи управління охороною праці в Україні», схваленою розпорядженням Кабінету Міністрів України від 12.12.2018 р. № 989–р. та у рамках виконання держбюджетної теми: «Дослідження фізичних факторів техногенного походження виробничих ризиків та засоби їх зниження. № 0121U111535».

**Мета і завдання дослідження.** Метою роботи є нормалізація акустичного навантаження на людей у виробничих та побутових умовах з боку будівельних майданчиків в умовах щільної забудови.

**Завдання:**

- аналіз існуючих досліджень та прикладних розробок у галузі захисту працюючих та населення від техногенного шуму та інфразвуку,
- натурні вимірювання рівнів шуму та інфразвуку будівельної техніки, будівельних робіт тощо в умовах їх виконання у населених місцях,
- вдосконалення розрахункового апарату щодо визначення ефективності звукоізолюючих матеріалів та акустичних екранів,
- розроблення й випробування захисних матеріалів і конструкцій в умовах реальної експлуатації.

**Об'єкт дослідження** – процеси розповсюдження будівельного шуму в умовах щільної забудови і його екранування захисними конструкціями.

**Предмет дослідження** – залежності ефективності зниження рівнів звуку та інфразвуку захисними конструкціями від масогабаритних й конструктивних параметрів матеріалів й виробів та визначення їх найбільш раціональних показників.

**Наукова новизна одержаних результатів.**

*Вперше:* обґрунтовано засади проєктування широкосмугових звукопоглинальних конструкцій, що дозволило забезпечити індекси зниження звуку у низькочастотній частині звукового спектра 5–8 дБ, у середньо та високочастотній області – 25–35 дБ.

*Вдосконалено:* існуючі моделі поглинання звуку пористими середовищами шляхом визначення відповідних коефіцієнтів через опір продуванню та здійснення розрахунків у дійсній формі.

*Набули подальшого розвитку:* розрахункові методи прогнозування ефективності шумозахисних екранів застосуванням, на відміну від існуючих методів, параметрів матеріалів, які є довідковими. Це дозволило зменшити обсяги експериментальних досліджень з випробування ефективності захисних конструкцій та отримання вихідних даних.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає у наступному:

Вдосконалений розрахунковий апарат дозволяє здійснювати прогнозування захисних властивостей матеріалів і конструкцій у залежності від амплітудно-частотних характеристик звуку та інфразвуку та умов їх застосування фахівцями-практиками без спеціальної підготовки. У розрахунки закладено використання довідкових параметрів матеріалів з мінімальною кількістю даних, які отримуються експериментально у лабораторних умовах. Визначені засади проектування конструкцій дозволяють у практичній роботі нормалізувати рівні шуму та інфразвуку у залежності від їх інтенсивності, розташування шумозахисних конструкцій тощо. Випробування захисних конструкцій у реальних умовах експлуатації свідчить про їх достатню ефективність. Результати досліджень впроваджено у навчальний процес Київського національного університету будівництва і архітектури при підготовці фахівців з цивільної безпеки та технології захисту навколишнього середовища

**Особистий внесок здобувача.**

У роботі [1] визначено індекси зниження шуму резонансними панелями суцільної структури та перфорованими панелями. Визначено залежності індексів зниження шуму захисними панелями з різними критичними частотами. У [2] проведено розрахунки щодо ефективності резонансних панелей з різними максимальними амплітудними значеннями низькочастотного звуку та інфразвуку. У [3] виконано натурні вимірювання шуму будівельної техніки та резервних

джерел електроживлення. У [4] виконано натурні вимірювання рівнів звукового тиску в октавних смугах частот транспортних машин й компресорних станцій з різними типами двигунів; визначення еквівалентних рівнів звуку усієї номенклатури будівельної техніки. У роботі [5] дослідження щодо меж ефективного застосування тонких шумозахисних екранів й порівняння розрахункових та експериментальних даних щодо їх захисних властивостей.

#### **Апробація результатів дослідження.**

Результати дослідження доповідалися на:

1. Міжнародній науково-практичній конференції «Екологія. Ресурси. Енергія», м. Київ, 22-24 листопада 2023 р.
2. 5th INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND PRACTICAL CONFERENCE ENERGY. RESOURCES. ECOLOGY, November 27-29, 2024, KYIV.
3. 6th INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND PRACTICAL CONFERENCE ENERGY. RESOURCES. ECOLOGY, December 3-5, 2025, KYIV.

**Публікації.** Результати дисертаційного дослідження опубліковано у 8 наукових працях, серед яких 1 стаття у наукометричній базі «SCOPUS», 4 статті у наукових фахових періодичних виданнях рекомендованих Міністерством освіти і науки України, 3 тез доповідей у збірниках матеріалів наукових конференцій.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається з анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків і додатків. Загальний обсяг дисертації становить 120 сторінок, з них: 102 сторінки основного тексту, список використаних джерел із 108 найменувань на 13 сторінках; 3 додатків на 5 сторінках.

## **РОЗДІЛ 1. НОРМАТИВНА БАЗА ТА ІСНУЮЧІ ПІДХОДИ ДО ЗНИЖЕННЯ ШУМУ ТА ІНФРАЗВУКУ**

### **1.1. Шум та інфразвук техногенного походження як чинники негативного впливу на людей**

Численні дослідження останніх років свідчать про суттєвий вплив шуму на здоров'я людей. У роботі [1] наведено беззаперечні докази, що техногенний шум підвищує ризик атеротромботичних подій, включаючи гострий інфаркт міокарда (ІМ). Дослідження виконані протягом довгого часу з обстеженням більш ніж 200 000 мешканців, і не викликає сумнівів. У роботі [2] досліджується вплив будівельного шуму на людей. Проведено дослідження взаємозв'язок між різними типами будівельного шуму та фізіологічними реакціями. Показано, що шум у 80, 60 і навіть 40 дБА впливає на суб'єктивний рейтинг роздратування. Результати підкреслюють важливість управління шумом будівництва для пом'якшення його негативних наслідків для міських жителів. У дослідженні [3] показано, що найбільш шкідливий вплив на здоров'я людей мають комбінований вплив шуму з іншими чинниками, наприклад пилю. А у роботі [4] наведено зв'язок погіршення стану здоров'я не тільки з рівнями звуку, а й інтенсивністю праці. Останнім часом усе більше уваги приділяється впливу низькочастотному звуку та інфразвуку на ментальне здоров'я людини, що показано у [5]. Такий вплив особливо проявляється з боку технічних засобів з низькою частотою обертів, наприклад дизельних двигунів, які широко використовуються у будівельній галузі [6]. Можливі наслідки такого впливу наведено у роботі [7]. Ці впливи узагальнено у ґрунтовному дослідженні [8]. Таким чином можна вважати доведеним, що техногенний шум, у тому числі й інфразвук негативно впливає на людей й потребує максимального можливого зниження за рахунок розроблення й впровадження відповідних організаційно-технічних заходів.

## **1.2. Аналіз чинної національної та міжнародної нормативних баз з гранично допустимих рівнів та вимірювання шуму та інфразвуку**

Рівні шуму регламентуються низкою міжнародних та національних стандартів України. Актуальність проблематики підкреслена у вимогах загальноєвропейської директиви з обмеження впливу шуму на людей [9]. В цілому національну нормативну з акустичної безпеки базу можна умовно розділити на дві групи: санітарні норми, які визначають гранично допустимі рівні шуму та будівельні норми, які визначають засоби зниження рівнів шуму за рахунок інженерних рішень. У виробничих умовах гранично допустимі рівні шуму, ультразвуку та інфразвуку регламентуються санітарними нормами [10]. Щодо впливу на людей, то у цих нормах визначається інтенсивність шуму через ефективні значення звукового тиску з урахуванням корекції за шкалою «А». Перевагою нормативу є регламентація рівнів шуму для окремих категорій працюючих. Зокрема, на усіх видах транспорту, в офісних приміщеннях тощо. Але надано гранично допустимі рівні для роботи окремих видів будівельної техніки без надання регламентації щодо загального будівельного шуму та умов праці. Щодо параметрів інфразвуку на робочих місцях, то він розглядається у октавних смугах частот з середньгеометричними значеннями 2, 4, 8, 16 Гц. Відомо, що ефективним захистом від низькочастотних впливів є резонансі панелі. Але відомості у октавних смугах частот не надають точної інформації щодо налаштування панелей. У даному нормативі фактично відсутні норми даних по інфразвуку. Наявні дані дещо застарілі. Наприклад, гранично допустимі рівні на частотах 2 – 16 Гц за лінійною шкалою складають 105 дБ з еквівалентним рівнем 110 дБ, що не відповідає значенням у більшості країн Європи, і не відповідають вимогам Всесвітньої організації охорони здоров'я (ВООЗ) [11–13]. Згідно більшості документів еквівалентне значення гранично допустимого рівня інфразвуку слід вважати рівень 90 дБ за лінійною шкалою. Таке значення закладено у проєкт національних санітарних норм України з гранично допустимих рівнів інфразвуку, який перебуває у стадії затвердження. Для населення рівні шуму у приміщеннях житлових та

громадських будівель закладено у санітарні норми [14]. Зокрема, на території житлової забудови, на яку впливає шум об'єктів будівництва та реконструкції граничний рівень шуму денний час складає 60 дБА, у нічний – 50 дБА. Це досить жорсткий норматив, тому при виконанні будівельних робіт в умовах щільної забудови у більшості випадків необхідне впровадження відповідних організаційно-технічних заходів. Для цих умов допустимі рівні звукового тиску в октавних смугах частот знижується від 82 до 52 дБ, тобто навіть низькочастотна складова звуку має гранично допустимі значення 85–66 дБ. Таких показників, враховуючи високу проникність низькочастотного звуку, дуже важко досягти. Це ж стосується інфразвуку. Слід зауважити, що рівні звуку у житлових приміщеннях вдень і вночі 40–50 дБА, у національному нормативі й у найбільш вживаному Європейському нормативі [15] збігаються. Недоліком національної нормативної бази є розбіжності сучасних нормативів з рівнів шуму з діючими санітарними правилами з планування та забудови населених пунктів [16], які є застарілими. Перевагою національної нормативної бази є наявність сучасних державних будівельних норм щодо захисту від шуму територій, будинків і споруд [17, 18]. У цих документах докладно структуровано гранично допустимі рівні шуму у приміщеннях будь-якого призначення. Крім того, надано перелік характеристик матеріалів, які мають розглядатися з точки зору їх здатності до звукоізоляції та зниження шуму. Це густина, геометричні розміри, частотні характеристики ізоляції повітряного шуму, динамічний модуль пружності, індекси ізоляції повітряного шуму, акустичний імпеданс тощо. Але усі ці характеристики розглядаються при первинному будівництві і за наявності великих будівельних майданчиків. Це не завжди відповідає умовам щільної забудови у процесі виконання відновлювальних робіт. Крім того щодо застосування акустичних екранів у документах надано загальні вимоги, наприклад застосування Г подібних та П подібних екрануючих конструкцій. Слід враховувати, що існуючі підходи до проектування захисних екранів не зовсім задовільні. Це докладно показано у [19]. Якщо за прийнятою системою проектування екрани мають прийнятну ефективність для середніх і

високих частот, то у низькочастотній частині звукового спектра та для інфразвуку вони малоефективні, що потребує подальших досліджень.

Слід зауважити, що наведена недосконалість певним чином обумовлена різними підходами до визначення гранично допустимих рівнів у різних стандартах та країнах. Розглядаються як безпосередній вплив шуму на слуховий апарат і організм в цілому, так і дратівливий вплив шуму. Наприклад, у країнах Європи щодо транспортного шуму в основу покладено скарги населення на роздратування шумом транспортних потоків та літаків. Наприклад, стандарт [20] встановлює нормальні криві рівної гучності для чистих тонів з різними частотами акустичних коливань у вільному полі за різних умов прослуховування, в тому числі й на рівні порога чутливості. Цей документ визначає комбінації рівнів звукового тиску та частот чистих безперервних тонів, які сприймаються слухачами як однаково гучні. Специфікації базуються на таких умовах: а) звукове поле за відсутності слухача складається з вільної прогресуючої плоскої хвилі; б) джерело звуку знаходиться безпосередньо перед слухачем; в) звукові сигнали є чистими тонами; г) рівень звукового тиску вимірюється в положенні, де знаходився б центр голови слухача, але за відсутності слухача; д) прослуховування бінауральне; е) слухачі є отологічно нормальними особами у віковому діапазоні від 18 до 25 років включно. Сучасна версія цього стандарту, порівняно з версією 2022 року, набагато жорсткіша. Це обумовлено науковими напрацюваннями у даному напрямі.

У частині низькочастотного шуму спостерігаються найбільші розбіжності, що обумовлюється суб'єктивністю сприйняття низькочастотних коливань людиною. Наприклад, у стандарті [21] (Німеччина) закладаються критерії акустичного дискомфорту для людини, в залежності від часу доби, що важливо для території житлової забудови. Ці вимоги охоплюють й частину інфразвукового спектра і частину звукового спектра (10–63 Гц) з відповідним зниженням гранично допустимих значень від 95 до 33,5 дБ. Тому у практичній діяльності зі зниження впливу звуку та інфразвуку для людей, з урахуванням перспективи слід орієнтуватися на найбільш жорсткі вимоги.

Коректне вимірювання рівнів звуку та інфразвуку є складною задачею. В Україні вимірювання шуму у виробничому середовищі регламентується національним стандартом гармонізованим з міжнародним стандартом [22]. Він відповідає сучасним підходам до визначення і фактичних значень шуму, принаймні у країнах Європи [23]. Більш неоднозначна ситуація з вимірюванням рівнів інфразвуку [24]. Стандарт вважає інфразвуком частоти, нижчі за 20 Гц. Метод, описаний у цьому стандарті, відповідає безпосередньому сприйняттю інфразвуку. На сьогодні це єдина реакція людини, для якої існує велика база досліджень. Деякі наукові статті про роздратування від інфразвуку припускають, що роздратування може бути тісно пов'язане з безпосереднім сприйняттям. За цієї передумови рівні, виміряні до цього стандарту, відобразатимуть роздратування так само, як і безпосереднє сприйняття. Недоліком стандарту є те, що він пропонує для вимірювання рівнів звукового тиску застосовувати G – зважування з використанням відповідних приладів. Але сучасна повсякденна практика орієнтується на застосування лінійної шкали. А наявність незначного суттєвого і високого рівня інфразвуку визначається з різниці показів лінійної шкали та шкали корекції «А». Наприклад, різниця у 20 дБ свідчить про дуже суттєву наявність інфразвуку. Стандарт вимагає вимірювання у октавних смугах частот. Але відомо, що ефективний захист від впливу інфразвуку здійснюється резонансними конструкціями. А точні резонансні конструкції складно визначити навіть за вимірювання у третинооктавних смугах частот. Для проектування захисних матеріалів важливим показником є поглинання звуку. Коефіцієнт поглинання можна вимірювати у два способи: вимірюванням методом стоячої хвилі [25]. Це здійснюється у імпедансній трубі. Також можливо оцінити цей показник за допомогою функції переходу [26]. За наявності ревербераційної камери вимірювання можна здійснювати за методикою, описаною у [27]. Цей метод найбільш універсальним, тому що може розглядати не тільки пласкі поверхні. Порівняння викладених методик докладно описано у [28].

Сучасною тенденцією у визначенні впливу шкідливих та небезпечних чинників на людей є ризик-орієнтований підхід [29–30]. Але специфікою усіх фізичних чинників антропогенного походження, у тому числі і шуму, є певна невизначеність впливу на людей і відсутність надійних статистичних даних, які дозволяють розрахувати ризики негативного впливу з достатньою точністю. Наприклад, національний інститут виробничої безпеки та охорони здоров'я США (NIOSH) спирається на погіршення слуху на певних частотах. У відповідності з цим за експозиції шуму 90 дБА надмірний ризик складає 29 %, а за експозицію 80 дБА – 3 %. У той же час за таких експозицій шуму стандарт ISO надає значення 21 % і 0 % відповідно, що свідчить про неоднозначність. Слід враховувати, що не існує чіткого зв'язку між рівнями шуму й тривалістю його впливу на людей. Але він враховується й позначається як «фактор усереднення», або «фактор інтенсивності-часу». В основному застосуються значення «фактору усереднення» за величиною 3 дБ або 5 дБ за подвоєння або зменшення вдвоє тривалості впливу. Фактор усереднення величиною 3 дБ, який використовується Агентством охорони навколишнього середовища США, у Великобританії і багатьох інших країнах Європи, відомий як правило рівної енергії. Це правило стверджує, що однакові значення звукової енергії виробляють однакові значення погіршення слуху, незважаючи на часовий розподіл звукової енергії. Теоретично цей принцип може бути застосований до аналізу експозицій з тривалістю від декількох хвилин до багатьох років [31]. Проведений аналіз свідчить, що як національні, так і міжнародні нормативні акти відповідають вимогам сьогодення. Але, враховуючи розбіжності у деяких нормативах щодо гранично допустимих рівнях шуму та інфразвуку з урахуванням перспективи слід орієнтуватися на найнижчі значення. У частині вимірювання рівнів шуму слід враховувати як шум досліджуваних джерел, так і фонові значення, у тому числі й ефект маскування низькочастотного шуму. Вимірювання рівнів низькочастотного звуку та інфразвуку доцільно здійснювати не тільки у октавних та третинооктавних смугах частот, а й вимірювати неперервні спектри. Це надасть змогу визначити звук та інфразвук

максимальних амплітуд, що доцільно покласти у проєктувальні рішення з розроблення захисних конструкцій. Наявність резонансних конструкцій дозволяє мінімізувати масогабаритні параметри цих виробів й додати до них шумопоглинальні шари, ефективні для зниження шуму середніх та високих частот.

### **1.3. Існуючі засоби зниження рівнів шуму та інфразвуку у виробничих та побутових умовах**

Дослідження з мінімізації впливу шуму на працюючих і населення умовно можна розділити на три категорії: моніторинг шумового забруднення територій та виробничого середовища, розроблення організаційно-технічних заходів і засобів зниження рівнів шуму та моделювання поширення шуму у середовищі. Моніторингові дослідження необхідні для визначення необхідної ефективності засобів захисту людей. Виходячи з цього, впроваджуються організаційні заходи – зниження шумності обладнання, збільшення відстаней від джерел шуму до людей, проєктування колективних засобів захисту (шумозахисних та засобів звукоізоляції) та використання індивідуальних засобів захисту. Індивідуальні засоби захисту зазвичай використовуються на підприємствах із заздалегідь високими рівнями шуму – у турбогенераторних залах електростанцій, підприємствах цивільної авіації тощо. За наявності джерел шуму на межі гранично допустимих значень використовуються колективні засоби захисту, які є найбільш універсальними. Моделювання поширення шуму є головним методом передбачення акустичного навантаження на середовище на стадіях проєктування та експертизи проєктів будівництва. Моніторингу рівнів шуму приділяється багато уваги. Наприклад, у роботі [32] досліджується актуальна проблематика зниження шуму й вібрацій у висотних будівлях. На даному етапі середньо- та висотні будівлі заповнюють кожен куточок міського будівництва моєї країни, а великомасштабні будівлі також стали неминучим результатом міського планування та розвитку. Питання комфорту та безпеки, пов'язані з середньо- та висотними будівлями, а також комфорт та безпека, спричинені структурною вібрацією, також потрапили в поле

нашого зору. У цій статті ми розповімо про дослідження з контролю вібрації будівельних систем електропостачання, систем кондиціонування, мережевих систем, трубопровідних систем та інших допоміжних об'єктів будівлі, а також про дослідження з контролю вібрації будівельних конструкцій. Ці деталі відображають вдосконалення досліджень вібрації та зменшення шуму для підвищення комфорту та безпеки середньо- та багатоповерхових будівель. У роботі [33] досліджується шумове навантаження у навчальних закладах. Акустичні умови, що вважаються індикатором рівня комфорту, є основною проблемою в освітніх установах, оскільки вони пов'язані з самопочуттям студентів та їх здатністю до навчання. У цьому дослідженні за допомогою портативного вимірювача IEQ було проведено вимірювання акустичного комфорту в чотирьох обраних приміщеннях кафедри інженерії навколишнього середовища (аудиторія для четвертого курсу, коридор для студентів, коридор для викладачів і приймальня) Вавилонського університету в місті Хіллах. Це було зроблено шляхом аналізу даних, виміряних за 13 місяців з серпня (2020) по серпень (2021). Статистичний аналіз за допомогою тесту лінійної регресії був проведений для визначення взаємозв'язку між обраними областями. Шум є основним параметром для освітніх зон, який може заважати навчальній діяльності студентів і, зрештою, матиме негативний вплив на фізичне та психологічне здоров'я студентів. Отримані результати були порівняні з референтними значеннями, зазначеними в довіднику до міжнародних стандартів щодо дотримання шумового режиму в академічних освітніх установах. Результати показали, що у всіх досліджуваних приміщеннях кафедри інженерії докільця рівні фонового шуму перевищують рекомендовані граничні значення ( $>50$  дБ), що свідчить про низьку якість внутрішнього середовища цих приміщень та вказує на необхідність втручань. Це дослідження можна вважати пілотним для майбутніх порівняльних досліджень в іракських університетах.

Недоліком дослідження є визначення рівнів шуму тільки у звуковій частині акустичного спектра. Як показано у [34–35] у навчальних закладах можуть бути присутні інфразвук та низькочастотний звук наднормативних значень, що потрібно

враховувати у практичній діяльності. Дослідження [36] стосується будівельного шуму й управління його рівнями. Будівельний шум – одна з найважливіших та найпоширеніших професійних небезпек у будівельній галузі. Негативні наслідки конструкційного шуму можна пом'якшити, впроваджуючи ефективний процес управління шумом на етапах попереднього будівництва та будівництва. Поточні теми досліджень у сфері управління шумом будівництва є фрагментарними, і існує потреба у комплексному огляді, який безпосередньо досліджує процес управління шумом та його застосування в будівельній галузі з метою виявлення дослідницьких тем та їх основних досягнень, виявляють обмеження та прогалини. Це дослідження пропонує нову рамку управління шумом будівництва та класифікує попередні дослідження, проведені в області управління шумом будівництва. Рамка вводить чотири основні кроки для управління шумом будівництва, включаючи оцінку шуму, прогнозування шуму, контроль шуму та моніторинг шуму. Потім аналіз вмісту проводиться для попередніх досліджень відповідно до чотирьох ідентифікованих етапів управління шумом. Основний внесок цього огляду полягає у наданні дослідникам та практикам цілісне розуміння процесу управління конструкцією для покращення роботи. Можна дійти висновку, що розроблено певний порядок прогнозування шуму. Але не надано практично значущих рекомендацій з його зниження. У дослідженні [37] систематизується проблематика моніторингу у побутовому середовищі. Забруднення міського шуму – це всюдисуща, але часто нехтувана загрозою для здоров'я населення, до якої необхідно терміново вирішити. Пасивні заходи контролю шуму, які менш ефективні для зменшення низькочастотного шуму і часто є об'ємними і можуть перешкоджати повітряному потоку. Як свідчать автомобілі, активний контроль шуму кабіни призвів до легших автомобілів через зменшення пасивної ізоляції. Незважаючи на свою давню історію та недавню популярність навушників для споживачів, реалізація активного контролю шуму в побудованому середовищі все ще рідкісна. На сьогоднішній день в джерелі, в будівельних машинах та, на шляху передачі, було продемонстровано активний контроль шуму (ANC), у джерелі

шуму. Недавній попит на природно-вентильовані будівлі також спричинив розробку рішень активного контролю на приймальному кінці, наприклад, у Windows. Десять питань мають на меті демістифікувати принципи АНК та виділити сфери, в яких екологічний шум можна активно пом'якшити. Оскільки реалізація активного контролю в побудованому середовищі зазвичай включає багато зацікавлених сторін, вирішуються оперативні проблеми. На закінчення виявлені прогалини в дослідженні, які дозволять збільшити прийняття АНК у побудованому середовищі. Існує також поновлений інтерес до застосування інтелектуального АНК для вирішення екологічно складних додатків, таких як різний рівень шуму в навушниках АНК, особливо з появою низької, низької потужності, високоефективної вбудованої електроніки; просування технології спікера; і новий поштовх з алгоритмів цифрової обробки сигналів та штучного інтелекту. Але надання певного алгоритму не дає можливості конкретно застосувати засоби захисту. У роботі [38] розглядається конкретна проблематика шуму від трансформаторних підстанцій, зокрема вбудованих, що є проблемою у висотних будівлях. Урбанізація призвела до все більшої кількості станцій трансформаторів, що призвело до незначних проблем з шумом будівництва. Однак проблеми з шумом зберігаються через неадекватну характеристику шуму та використання недосконалих індексів оцінки шуму для централізованих підстанцій. На основі цієї проблеми в цьому дослідженні запропонований метод аналізу шумного з'єднання вібраційного шуму, заснований на емпіричному розкладанні режиму (EMD) та аналізу спектра. Запропонований метод точно та ефективно екрани та характеризує шум трансформатора та забезпечує теоретичну основу для зменшення шуму трансформатора. Для перевірки ефективності запропонованого методу трансформатор був реконструйований як приклад. Було встановлено, що низькочастотний шум від трансформатора в основному був викликаний коливаннями з частотою нижче 500 Гц, зокрема частотами 300 Гц і 100 Гц та 50 Гц. За допомогою розрахунку та аналізу власних значень були запропоновані заходи зменшення шуму, орієнтовані на зменшення вібрації. Зрештою, було досягнуто

зменшення шуму на 10 дБ, що відповідає вимогам комфорту. Цей метод може точно та ефективно визначати характеристики шуму трансформатора, що складає недостатність аналізу характеристик трансформатора в минулому. Необхідно надати вказівки для вдосконалення індексу оцінки шуму трансформатора.

Практичні наслідки: проблема шуму, спричинена підстанціями, стає все більш серйозною. Звичайні методи виявлення шуму та зменшення шуму вже не можуть відповідати вимогам людей до звукового комфорту. Метод аналізу з'єднання вібрації та шуму на основі аналізу ЕМД та спектру, запропонованого в цьому дослідженні, може ефективно витягнути характеристики шуму трансформатора. Він надає теоретичну підтримку перетворення шуму трансформаторів і вирішує проблему, що поточна трансформація інженерного зменшення шуму не має теоретичної основи. Характерний аналіз шуму може компенсувати недоліки існуючих показників акустичного комфорту, які використовують рівень звукового тиску лише як показник оцінки. Перевагою роботи є акцентування на низькочастотному шумі. Але вона стосується саме виявлення шуму, а не засобів боротьби з ним. Дослідження [39] стосується шуму інженерних мереж у будівлях. Найпоширеніші джерела шуму в будівлях пов'язані з системами опалення, вентиляції та кондиціонування (HVAC), сантехнічними системами, електричними системами та зовнішніми джерелами. Методи управління пасивним шумом (PNC) в будівлях були реалізовані кількома способами. Метою цієї роботи є аналіз використання глушника для послаблення шуму в каналах, що входять до вентиляційних систем у будівлях, системах внутрішнього згоряння, вентиляторів, систем провідності газу, котлів тощо. Основною метою глушника є зменшення передачі шуму, заважаючи якомога менше циркуляції газу або рідини. У першу чергу глушники класифікуються як реактивні та дисипативні, залежно від того, чи утворюється ослаблення шуму відповідно відбиваючими або дисипативними механізмами. У реактивному глушнику втрати виникають по суті через відбиття звукових хвиль у розривах імпедансу, таких як розширення або звуження трубки. У дисипативних глушниках

потік контактує з великою поверхнею абсорбентного матеріалу. Потім ослаблення шуму виробляється за допомогою в'язко-термальних втрат у пористому матеріалі. У цій роботі практичне питання буде вирішено зі зменшенням шуму на 19 дБА в 60 Гц. Значна кількість робіт приділяється моніторингу низькочастотного звуку та інфразвуку [40–41]. Але у більшості вони або констатують факт наявності низькочастотного звуку та інфразвуку, або наголошують на можливих негативних явищах для людей [42–44]. Крім того, у роботі [45] досліджено маскувальний ефект низькочастотного звуку, тобто шум середніх та високих частот частково маскує наявність низькочастотних компонент. У зв'язку з поширенням вітрової енергетики більшість досліджень стосується поширення інфразвуку від вітрових турбін [46–48]. Фактично ці роботи стосуються кількісних значень низькочастотного звуку та інфразвуку вітрових турбін. Але такі дані неоднозначні. Критичні рівні інфразвуку фіксуються на відстанях від 700 до 4000 м, при цьому режими роботи турбін стандартні. Існують розбіжності у виявлених спектрах низькочастотного звуку та інфразвуку [49–51]. Але цей показник є критичним для розроблення засобів захисту. Відомо, що у низькочастотній області звукового спектра і для інфразвуку найбільш ефективними є резонансні конструкції. Тому для їх розроблення необхідна наявність надійних даних щодо спектральних складів, а саме значення звуку та інфразвуку найбільших амплітуд. Слід враховувати проходження структурного низькочастотного звуку та вібрацій будівельними конструкціями [52–53]. Як відомо, низькі коливання майже не поглинаються будівельними конструкціями, тому боротьба з ними є ефективною при ліквідації у джерелі. Контролю рівнів шуму у будівлях присвячені дослідження [54–56]. Але сам по собі контроль дає тільки орієнтири для впровадження засобів захисту, параметри яких залишаються поза увагою. На стадіях проектування забудови або плануванні робіт з відновлення та реконструкції ефективним методом є моделювання поширення шуму та інфразвуку. У роботі [57] здійснено моделювання поширення звуку та інфразвуку будівельними конструкціями. А у роботі [58] розроблено засади картографування рівнів шуму на певній території. У

роботах [59–60] закладено теоретичні засади проектування засобів шумопоглинання та звукоізоляції. Але на сьогодні вони є застарілими. Певним чином це пояснюється зміною характеристик шуму, особливо низькочастотного звуку та інфразвуку [61]. Найбільш повно проблематика моделювання поширення шуму у будівництві викладена у [62]. При будівництві в межах міста поширюваний будівельний шум вважається основним джерелом неприємних відчуттів для прилеглих територій. Через невелику відстань між будівельним майданчиком і сусідніми будівлями пасивні методи контролю шуму, такі як шумові бар'єри, мають обмежений пом'якшувальний вплив. Як наслідок, будівельні компанії повинні очікувати скарг і судових позовів від мешканців прилеглих будинків, що може призвести до затримок у реалізації проекту або перевитрати коштів. Попередні дослідження в галузі контролю будівельного шуму були зосереджені переважно на рішеннях, що працюють в режимі реального часу, таких як збір даних за допомогою датчиків на етапі виконання робіт. Хоча керівні принципи рекомендують, що управління джерелами є найефективнішим методом контролю будівельного шуму, не існує системного підходу для зосередження уваги на будівельному шумі на етапі планування. Інформаційне моделювання будівель (ВІМ) широко використовується для досягнення ефективного управління проектами, наприклад, для контролю часу та витрат. Однак переваги ВІМ для планування часу з урахуванням шуму на етапі перед будівництвом все ще потребують використання. Це дослідження зосередиться на потенціалі ВІМ для вирішення проблеми будівельного шуму як додаткового фактора під час планування часу. Результати показують, як можна планувати й контролювати різні технологічні процеси з використанням платформ, що підтримують ВІМ, щоб досягти найменшого ризику дискомфорту для мешканців прилеглих районів. У дослідженні [63] розроблені засади тривимірного моделювання поширення шуму з урахуванням чинних вимог щодо його контролю та зниження. Шум є однією з головних проблем у містах. Для моніторингу та управління проблемами шуму державні організації на всіх рівнях зобов'язані регулярно проводити дослідження

шуму. Моделювання шуму є важливою частиною цих досліджень. Наразі різні організації збирають власні вхідні 3D-дані, необхідні для моделювання шуму, у напівавтоматичний спосіб, навіть якщо території перетинаються. Це не є ефективним, а також відмінності у вхідних даних можуть призвести до відмінностей у результатах моделювання шуму, що негативно впливає на достовірність досліджень шуму. Для вирішення цієї проблеми в цій статті представлено методологію автоматичної генерації вхідних 3D-даних, необхідних для моделювання шуму (тобто будівель, рельєфу місцевості, земельного покриття, мостів і шумозахисних бар'єрів), на основі поточних 2D-топографічних даних і хмар точок. Згенеровані дані можна безпосередньо використовувати в існуючому програмному забезпеченні для моделювання шуму. Тест із згенерованими даними показує, що результати моделювання шуму, отримані на основі згенерованих нами даних, можна порівняти з результатами, отриманими в поточних дослідженнях шуму з практики. Автоматично згенеровані вхідні дані для моделювання шуму, як це зроблено в цій роботі, можна вважати важливим кроком у дослідженнях шуму. Це не тільки значно підвищує ефективність досліджень шуму, тим самим зменшуючи їх вартість, але й забезпечує узгодженість між різними дослідженнями, а отже, підвищує надійність і відтворюваність результатів. Крім того, наявність стандартизованих вхідних даних по всій країні може допомогти вдосконалити методи моделювання шуму, оскільки метод розрахунку може бути адаптований до вдосконалених способів збору та реконструкції 3D-даних. Проблематика зниження рівнів шуму з економічної точки зору наведена у [64]. Рівні шуму пов'язані з вартістю житлового фонду. Серед факторів навколишнього середовища шум є одним з найбільш важливих факторів, що впливають на здоров'я людей, рівень якості міського середовища і, відповідно, на вартість нерухомості. Таким чином, питання шумового забруднення відіграє значну роль у державній міській політиці, спрямованій на підвищення рівня акустичного комфорту та створення більш сталих і комфортних міст. Ринок нерухомості є дуже чутливим до шумового фактора, і ціни на житло можуть сильно залежати від високого рівня акустичного

забруднення. Метою цього дослідження є аналіз функціональних зв'язків між шумовим забрудненням та цінами на житло в чотирьох муніципальних районах міста Барі (Південна Італія). Для кожного району було визначено вибірку з двохсот об'єктів житлової нерухомості, проданих у 2017–2019 роках, для виявлення основних факторів, що впливають на ціни, та дослідження впливу шуму на них. За допомогою економетричного методу було отримано чотири різні моделі (по одній для кожного муніципального району міста Барі), здатні пояснити специфічний вплив рівня шумового забруднення на ціни продажу. Порівняння результатів, отриманих для кожного району, підтверджує очікувані явища щодо зменшення впливу шумового компонента на ціни на житло від центральної частини міста до периферії. Для приміської зони міста Барі отримана модель не включає фактор шумового забруднення, що свідчить про меншу важливість екологічного фактора на етапах торгу між покупцем і продавцем. Проблема захисту від шуму дуже широка через різноманітність джерел шуму та залежність амплітудно-частотних характеристик шуму навіть однотипних джерел [65–69]. Але найбільш типовим джерелом шуму у населених місцях є транспортний шум. Це шум будь-яких транспортних засобів, у тому числі й будівельної техніки. Вирішення задач зниження цього шуму є задача керування акустичним навантаженням, що можливо лише за умови комплексного підходу – використання натурних вимірювань, методів зниження шуму й залучення до вирішення задач у цих зацікавлених сторін [70–71]. Залежність шуму від кількості населення та структури забудови у зв'язку зі скаргами населення наведено у [72–74]. Але даним визначення значень транспортного шуму присвячено багато теоретичних та експериментальних робіт [75–77]. Певним чином ці дані застарілі. Але на їх основі побудовані базові моделі поширення шуму з урахуванням наявних перешкод [78–79]. Ці співвідношення включені до основних міжнародних нормативів шуму є базовими для будь-яких моделей. При цьому у практичній діяльності необхідно враховувати вплив підстилаючих поверхонь. В умовах обмеженої забудови важливим є врахування поширення акустичних хвиль над імпедансними поверхнями, у тому числі й

врахування відбиття від фасадів будівель [80–91]. Зокрема у роботах [92–93] закладено основи проектування акустичних екранів прогнозованої ефективності. На основі картографування рівнів шуму за результатами натурних вимірювань надано розрахунковий апарат для проектування акустичних екранів [94–95]. Такий підхід дозволяє оцінити акустичне навантаження як у приміщеннях, так і на територіях на стадіях проектування забудови та виконання будівельних робіт. Методи моделювання поширення транспортного шуму [96–97] дозволяють отримати достовірні дані щодо впливу відбиваючих поверхонь та оцінити ефективність акустичних екранів [98–99]. Слід враховувати, що амплітудно-частотні характеристики шуму суттєво змінюються і навіть з'являються нові чинники, наприклад, безпілотні літальні апарати, які використовуються у цивільній сфері [100]. Випромінювання шуму є значною перешкодою для широкого використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Оцінка та зменшення шуму від БПЛА вимагає перевірених підходів до моделювання. ЄС нещодавно запровадив процедуру вимірювання звукової потужності БПЛА, яка базується на процедурі вимірювання машин або обладнання. Неясно, чи надасть ця законодавчо закріплена оцінка шуму корисні дані для моделювання шуму БПЛА на навколишнє середовище. Метою цього дослідження було визначення рівня звукової потужності БПЛА відповідно до законодавчо встановленого стандарту ISO 3744 та дослідження придатності комерційних реалізацій стандарту ISO 9613 для моделювання шумового випромінювання від БПЛА. Для дослідження використовувався БПЛА класу С1, який також включав контрольовані випробування на естакадах. Було виміряно і змодельовано кілька різних умов експлуатації та проведено порівняння результатів. БПЛА, що використовувався, мав потужність звуку 86,8 дБ(А), а змодельовані випробування на естакадах узгоджувалися з експериментальними значеннями в межах  $\pm 2,1$  децибела на відстані до 30 м і під кутами 45–90° до приймача. Потім перевірена модель була використана для тематичного дослідження шумового випромінювання БПЛА в міських умовах. Модель продемонструвала, що рівень шуму від БПЛА може

значно перевищувати рівень міського фонового шуму – до 10 дБ. Було виявлено, що висота польоту відносно висоти будівлі має значний вплив на кількість дозволених операцій БПЛА в рамках рекомендацій ВООЗ.

Існує великий масив даних, як експериментальних, так і теоретичних щодо фактичних рівнів шуму різних джерел, у тому числі й будівельного шуму. Для них характерним є певні розбіжності даних. Це пояснюється декількома незалежними причинами. Вимірювання рівнів шуму здійснюється в основному в октавних смугах частот, а також еквівалентне значення рівнів шуму. При цьому складно врахувати наявність низькочастотного шуму та інфразвуку. Їх додаткові значення можуть бути обумовлені сторонніми джерелами враховуючи низьке згасання низькочастотних коливань у повітрі. При цьому у реальних умовах практично неможливо врахувати інтерференційні дифракційні ефекти. Навіть відбиття від поверхонь на рівних відстанях можуть бути різні через різні імпедансні характеристики відбивальних поверхонь. Це ж стосується підстилаючих поверхонь. Існують кілька моделей для розрахунку рівнів шуму у містах з урахуванням щільності забудови, поверховості тощо. Але усі вони дають суттєві розбіжності обчислень, особливо у низькочастотній області звукового спектра [19]. У практичній діяльності накладання експериментальних і теоретичних похибок може призводити до незадовільних кінцевих результатів. Особливо це стосується проектування шумозахисних конструкцій. У багатьох випадках конструкції для захисту від шуму не мають достатнього наукового обґрунтування. А конструкції для захисту від інфразвуку взагалі не розглядаються або мають ескізний характер.

Недоліком більшості досліджень і прикладних розробок у галузі екранування шуму є розглядання абстрактного акустичного екрана. Такий підхід неможливо застосувати для проектування конструкцій із захисту від низькочастотного звуку та інфразвуку. На сьогодні існують дослідження, у яких застосовані новітні матеріали й підходи до створення звукопоглинальних матеріалів і конструкцій [101–102]. Ці роботи здебільшого експериментальні. Певним чином це пояснюється складністю і багатофакторністю моделей поширення звуку у

матеріалах. Зокрема усі моделі оперують кількома даними, які потрібно отримувати експериментально на дослідних зразках [103]. Доцільно доопрацювати математичний апарат щоб звести у розрахунки до пружних модулів, опору продуванню тощо перевести розрахунки до дійсної форми. Це спрощує процес обирання вихідних даних для проєктування захисних матеріалів і конструкцій [104].

### **Висновки до розділу 1**

1. Для розроблення організаційно-технічних заходів зі зниження впливу будівельного шуму на працюючих і населення необхідно отримати дані щодо рівнів шуму будівельної техніки в умовах обмежених просторів й щільної забудови.

2. Для отримання шумозахисних матеріалів і конструкцій необхідної ефективності потрібно вдосконалити існуючі розрахункові методики шляхом переведення розрахунків у дійсну форму, зведення розрахунків до мінімальної кількості експериментальних даних й оперування пружними модулями, які є довідковими величинами.

3. Необхідно дослідити ефективність тонких акустичних екранів в умовах обмежених просторів зі з'ясуванням меж їх ефективностей із врахуванням дифракційних ефектів та відбиття акустичних хвиль від різних імпедансних поверхонь.

4. Для проєктування захисних конструкцій резонансного типу необхідним є отримання неперервних спектрів низькочастотного звуку та інфразвуку, що дозволить визначити частоти найбільших амплітуд, які обираються за резонансні у процесі проєктування. Для розроблення багатошарових структур достатньої ефективності у низькочастотній, середнь- та високочастотній частинах звукового спектра необхідно обґрунтувати, розробити та випробувати конструкції різних конфігурацій.

## РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ І МЕТОДИКИ ВИМІРЮВАННЯ РІВНІВ ШУМУ ТА ІНФРАЗВУКУ І ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТЕЙ ЗАХИСНИХ МАТЕРІАЛІВ І КОНСТРУКЦІЙ

### 2.1. Особливості визначення кількісних значень низькочастотного звуку та інфразвуку

Вимірювання значень шуму та інфразвуку у реальних умовах, особливо в умовах обмежених просторів щільної забудови, будівельних майданчиків та окремих приміщень має певні особливості.

У дальній зоні звукового поля за великої віддаленості від джерела звуку, де поширення звукової хвилі відповідає співвідношенню  $kr \gg 1$ , де  $k$  – хвильове число,  $r$  – відстань до точки вимірювання, інтенсивність звуку пропорційна квадрату звукового тиску. В інженерній практиці вимірювання шуму машин і механізмів вважається що дальнє поле відповідає відстані, більшій ніж довжина звукової хвилі, або у 2–3 рази більша найбільшого лінійного розміру джерела шуму. У дальньому звуковому полі звукову хвилю можна розглядати як пласку чи сферичну. Поширення звук у дальньому звуковому полі відповідає співвідношенням  $p \sim 1/r, I \sim 1/r^2$ .

У ближній зоні звукового поля, тобто наближеній до джерела звуку, напрямок коливань пружного середовища (повітря) не завжди збігається із напрямом поширення звукової енергії. У ближньому полі звуковий тиск не може характеризувати акустичну потужність джерела. У багатьох випадках за обмежених просторів і наявності відбиваючих поверхонь формується дифузне звукове поле, коли звукові хвилі поширюються в усіх напрямках з однаковою амплітудою. При цьому середня густина енергії звуку збігається по усьому полі. Дифузне поле формується здебільшого у окремих приміщеннях. Інтенсивність шуму оцінюється здебільшого за октавними смугами частот. Для звукового спектра це 31,5; 63; 125; 250; 500; 1000; 2000; 4000; 8000 Гц. Відповідно для

інфразвукової частини акустичного спектра це 2; 4; 8; 16 Гц, де усі цифри є середньгеометричними значеннями. Для більш точного визначення звукового спектра вимірювання здійснюються у третинооктавних смугах частот згідно ISO 266. Вимірювання рівнів інфразвуку у третинооктавних смугах частот жодним нормативом не передбачено. Але якщо вимірювання здійснюються з метою розроблення захисних конструкцій доцільним є вимірювання рівнів інфразвуку у третинооктавних смугах 1,6; 2,0; 2,5; 3,15; 4,0; 5,0; 6,3; 8,0; 10,0; 12,5; 16,0; 20,0 Гц. Враховуючи, що засоби захисту від шуму різної частоти відрізняються, шум поділяють на кілька умовних ділянок – низькочастотний шум – до 300 Гц, середньочастотний шум – 300–800 Гц, високочастотний шум – вище 800 Гц. У процесі вимірювання слід враховувати, що шум може мати різні спектри (характери спектрів). Їх умовно можна розділити на широкосмугові, з неперервним спектром шириною більше однієї октави і тональні, у яких спектр містить чіткі дискретні складові. При виконанні вимірювань слід враховувати часовий фактор. Шум може бути постійним та непостійним. Це потребує проведення усереднення показників за певний час.

Для вимірювання рівнів шуму слід використовувати спеціальні мікрофони. Вони повинні бути мінімальних розмірів порівняно з довжиною звукової хвилі, до того ж їх характеристики спрямованості рівномірні. Для вимірювань доцільно використовувати конденсаторні мікрофони, які мають рівномірну частотну характеристику. У разі наявності вітру на відкритому просторі необхідно застосовувати захисні чохла для мікрофону. Для вимірювання рівнів звукового тиску з метою визначення впливу на людей використовують шкалу корекції «А», що позначається як дБА. Згідно більшості нормативів шум машин і механізмів вимірюється за шкалою «D», а інфразвуку – за шкалою «G». Але у інженерній практиці здебільшого доцільно застосовувати порівняння показів приладів за лінійною шкалою (Lin) та показів з даними за корекцією «А». При визначенні ефективності шумозахисних екранів обов'язково слід враховувати наявність

дифракційних ефектів на кромках екранів та вплив імпедансних відбивальних поверхонь.

## **2.2 Методи і обладнання вимірювання кількісних значень шуму та інфразвуку**

Вимірювання рівнів шуму та інфразвуку здійснювалося методом натурних вимірювань з використанням каліброваного обладнання. Дослідження здійснювалося з використанням шумоміра ОКТАВА-110А. Він є шумоміром класу 1 і обладнаний октавними а третинооктавними фільтрами.

Технічні характеристики шумоміра ОКТАВА-110А:

- діапазон вимірів – 22–139 дБА (з мікрофоном 50 мВ/Па);
- рівень власних електричних шумів – менше 10 дБА;
- фільтр у режимі «Звук» – октавні фільтри 31,5–16000 Гц, третинооктавні фільтри 25–20000 Гц;
- фільтр у режимі «Інфразвук» – октавні фільтри 2–16 Гц, третинооктавні фільтри 1,6–20 Гц;
- фільтр у режимі «Ультразвук» – третинооктавні фільтри 5–40 кГц ;
- фільтр у режимі «Загальна вібрація» – октавні фільтри 1,0–125 Гц, третинооктавні фільтри: 0,8 Гц–160 Гц;
- фільтр у режимі «Локальна вібрація» – Жовті фільтри 8–1000 Гц, третинооктавні фільтри 6,3–1250 Гц.

Низькочастотний звук вимірювався за шкалою корекції «А», а інфразвук – за лінійною шкалою. Згідно норматива [10] наявність інфразвуку визначається за різницями показів лінійної шкали і шкали «А». Якщо різниця показів 10 дБ і більше, то присутність інфразвуку суттєва. Вимірювання як звуку, так і інфразвуку здійснювалося у октавних та третинооктавних смугах частот. Для проектування засобів захисту у низькочастотній частині звукового спектра та для інфразвукових коливань вимірювався неперервний спектр, що надавало змогу точно визначити

частоти звуку та інфразвуку максимальних амплітуд. Це необхідно для проектування конструкцій резонансного типу. Вимірювання неперервного спектра отримувалося за допомогою конденсаторного мікрофона з прямим підключення до звукової карти персонального комп'ютера. На комп'ютері встановлено програма оброблення акустичного спектра Spectrogram. Це дозволяє візуалізувати акустичний спектр за рахунок відцифровки сигналів мікрофону звуковою картою. У лабораторних умовах шумозахисні властивості матеріалів вимірювалися з використанням імпедансної труби у ревербераційній камері згідно ISO 10534. Довжина труби – 1000 мм, діаметр – 100 мм, джерело звуку – широкосмуговий генератор шуму. Труба обладнана двома конденсаторними мікрофонами. Вимірювався рівень звукового тиску, коефіцієнт відбиття, імпеданс та коефіцієнт поглинання. Випробування ефективності акустичних екранів здійснювалося методом прямих вимірювань на викритих майданчиках за відсутності спрямованого руху повітря.

### **2.3. Розрахункові методи визначення та прогнозування рівнів шуму та ефективності шумозахисних конструкцій**

У частині звукового спектра визначаються звуковий тиск, інтенсивність звуку, у тому числі ці параметри за наявності кількох джерел звуку. Звуковий тиск – це різниця між миттєвим значенням повного тиску і статичним тиском у даній точці. Він характеризує зміну густини середовища в напрямі поширення коливань.

$$p_{ск} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt},$$

де  $T$  – час вимірювання,

$p(t)$  – миттєве значення звукового тиску.

Значення  $p$  вимірюють на певній відстані від джерела шуму в заданій смузі частот.

Рівень звукового тиску  $L$ , дБ визначають відносно порогового середньоквадратичного значення звукового тиску  $p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Па}$  за формулою:

$$L = 10 \lg \left( \frac{p^2}{p_0^2} \right) = 20 \lg \left( \frac{p}{p_0} \right).$$

Тиск  $p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Па}$  приблизно дорівнює порогу чутливості на частоті 1000 Гц.

Людина сприймає звук від 0 (нульовий поріг) до 140 дБ (поріг, який спричиняє біль).

Звуковий тиск може бути оцінений у напрямі максимального випромінювання або у границях заданих просторових кутів, таким чином визначаються просторові характеристики джерела.

Рівень звукової потужності  $L_p$  дБ визначають відносно порогової потужності  $p_0 = 10^{-12} \text{ Вт}$  за формулою:

$$L_p = 10 \lg \left( \frac{p}{p_0} \right).$$

Звукова потужність є мірою швидкості випромінювання звукової енергії, тобто звуковою енергією, що віднесена до одиниці часу.

Рівень інтенсивності звуку  $L_1$ , дБ визначають відносно порогового значення  $I_0 = 10^{-12} \text{ Вт/м}^2$  за формулою:

$$L_1 = 10 \lg \left( \frac{I}{I_0} \right).$$

Зазначимо, що  $I_0 = \frac{p_0^2}{\rho c}$ , де  $\rho c$  – хвильовий опір, який для повітря дорівнює  $416 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$ .

При розрахунках рівня звукового тиску  $L$  потрібно керуватися такими правилами:

- 1) Якщо різниця двох джерел більша за 0 дБ, то найменше джерело можна не враховувати;
- 2) Різниця джерел з однаковими рівнями дорівнює 0;
- 3) Зміна рівня звукового тиску на 5 дБ відповідає зміні рівня інтенсивності звуку в 3 рази;
- 4) Зміна рівня звукового тиску на 10 дБ відповідає зміні гучності майже в 2 рази, 15 дБ – в 3 рази і т.д.

Сумарний рівень декількох джерел з однаковими рівнями звукового тиску дорівнює:

$$L_{\Sigma} = L + 10 \lg n,$$

де  $L$  – рівень звукового тиску одного джерела,

$n$  – кількість джерел.

Якщо джерела мають різні рівні звукового тиску,  $L_i$ ,  $i = 1, 2 \dots n$ , то:

$$L_{\Sigma} = L + 10 \lg \left( 10^{0,1L_1} + 10^{0,1L_2} + \dots + 10^{0,1L_n} \right).$$

Потрібно відзначити, що звуковий тиск, та інтенсивність звуку є точковими характеристиками звукового поля. Вони залежать від розташування точки вимірювання та умов поширення звукових хвиль.

На багатьох підприємствах, зокрема будівельних майданчиках рівні шуму не постійні. У таких випадках робиться усереднений показник еквівалентного рівня шуму за певний період часу.

$$L_{A\text{екв}} = 10 \lg \left[ \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \frac{P_A^2(t)}{P_0^2} dt \right].$$

Або

$$L_{\text{екв}} = 10 \lg \left[ \frac{1}{T} \sum_{i=1}^n t_i \cdot 10^{0,1L_i} \right].$$

де  $T$  – період спостереження, год;

$t_i$  – тривалість дії шуму з рівнем  $L_i$ , год;

$L_i$  – логарифмічний рівень інфразвуку в  $i$ -й проміжок часу, дБ;

$n$  – загальна кількість джерел.

Як показано у [105] приблизна оцінка виразності інфразвуку може здійснюватися за загальним рівнем звуку, вимірним за шкалою «Lin», та експрес-показником  $\Delta$  – різницею рівнів звуку, вимірних за шкалами «Lin» та «A»:

$$\Delta = L_{\text{Lin}} - L_A$$

Чим більша різниця рівнів звуку, вимірних за шкалами «Lin» та «A», тим значніший внесок низькочастотних та інфразвукових складових у спектрі досліджуваного шуму. Якщо ця різниця становить від 6 до 10 дБ, то вважають, що наявні ознаки інфразвуку; якщо різниця становить 11–20 дБ, вважають помірно вираженим інфразвук; якщо різниця становить 21–30 дБ – вираженим; якщо більше 30 дБ – інфразвук значний.

Для врахування дивергенції (поширення звуку) застосовується співвідношення:

для сферичних звукових хвиль:

$$\Delta L_r(r) = 20 \lg r$$

для циліндричних хвиль:

$$\Delta L_r(r) = 10 \lg r$$

де  $r$  – відстань до точки визначення шуму

Зазвичай акустичні екрани розташовуються на поверхні землі, тому треба враховувати імпеданс поверхні, на якій екран розташовано. Сумарне зниження рівня шуму у цьому випадку розраховується зі співвідношень:

$$\Delta L = 20 \lg \left( \frac{p_0}{p_{\text{екр+зем}}} \right),$$

$$\Delta L_{\text{зем}} = 20 \lg \left( \frac{p_{\text{зем}}}{p_{\text{екр+зем}}} \right),$$

де  $\Delta L_{\text{зем}}$  – сумарний індекс зниження шуму,

$\Delta L$  – індекс зниження шуму екраном за рахунок ефекту дифракції,

$p_0$  – рівень звукового тиску без екрана,

$p_{\text{зем}}$  – рівень звукового тиску у повітрі при наявності відбиваючої поверхні,  $p_{\text{екр+зем}}$

– рівень звукового тиску при наявності екрана та відбиваючої поверхні/

Звукопоглинальні властивості матеріалів і конструкцій характеризуються, зокрема коефіцієнтами відбиття  $R$ . Імпеданс поверхні визначається співвідношенням:

$$Z = \frac{\rho_0 c_0 + R}{\rho_0 c_0 - R}; R = \frac{Z - \rho_0 c_0}{Z + \rho_0 c_0}; \alpha = 1 - |R|^2.$$

де  $\rho_0 c_0$  – імпеданс повітря,

$Z$  – імпеданс повітря,

$\alpha$  – коефіцієнт звукопоглинання.

Коефіцієнт поширення пружних хвиль у матеріалі  $\gamma$  визначається співвідношенням:

$$\gamma = i\omega \sqrt{\frac{\rho}{K}}.$$

де  $\omega$  – циклічна частота,

$\rho$  – густина матеріалу,

$K$  – модуль об'ємної пружності матеріалу.

Для пористих матеріалів необхідно також враховувати пористість матеріалу, а для резонансних – циліндричну жорсткість панелі.

Слід враховувати, що пористість і циліндрична жорсткість матеріалу не є довідковими величинами, тому доцільно дослідити можливості визначення цих параметрів через стандартні показники, що спрощує процес проектування матеріалів і конструкцій.

## Висновки до розділу 2

1. Методи визначення рівнів шуму, у тому числі й інфразвуку мають певні особливості. Головним із них є виконання вимірювань з врахуванням перебування приймача у дальній або ближній зоні акустичного поля. Вимірювання рівні звуку та інфразвуку навіть у третинооктавних смугах частот не завжди дає

достатньо інформації для проектування засобів захисту від акустичних впливів. Особливо це стосується низькочастотного звуку та інфразвуку. Резонансні конструкції ефективні для таких коливань, потребують точного визначення амплітудно-частотних характеристик коливань і виявлення коливань максимальної амплітуди.

2. Дослідження рівнів звуку необхідно виконувати каліброваними шумомірами з функціями вимірювання інфразвуку. При цьому обов'язковим є врахування відбиття та перевідбиття звукових хвиль і фактичні кінцеві розміри шумозахисних конструкцій. Експериментальне визначення ефективності звукопоглинальних матеріалів доцільно виконувати з використанням імпедансної труби у ревербераційній камері із застосуванням широкосмугового генератора шуму.

3. На стадіях проектування захисних матеріалів і конструкції доцільно застосовувати попереднє оцінювання загального рівня шуму, впливу дифракційних явищ та інших чинників розрахунковими методами. Слід враховувати наявність низки неакустичних параметрів, таких як пористість, згинна жорсткість, як не є стандартними довідковими величинами. Тому необхідно вдосконалити розрахунковий апарат для зведення частини параметрів до стандартних показників, які можна визначити простими розрахунками, або отримати з довідкових джерел.

Основні положення розділу 2 опубліковані автором у наукових працях [4].

## **РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ РІВНІВ ШУМУ ТА ІНФРАЗВУКУ БУДІВЕЛЬНОЇ ТЕХНІКИ ТА ВИЗНАЧЕННЯ УМОВ ЇХ МІНІМІЗАЦІЇ**

### **3.1. Дослідження рівнів шуму та інфразвуку на будівельних майданчиках в умовах щільної забудови**

Для переконливого обґрунтування необхідності впровадження організаційно-технічних заходів від шуму необхідно визначити параметри шуму та інфразвуку, які виникають у процесах виконання будівельних робіт.

В умовах щільної забудови об'єкти будівництва, ремонту, реконструкції та відновлення є вагомими джерелами міського шуму. Крім впливу на працюючих, вони можуть складати значний соціально-економічні втрати на прилеглих територіях й вимагають особливої уваги у галузі шумозахисту. Дослідженням шуму будівельних майданчиків приділяється багато уваги в Україні і у світі. Але у зв'язку зі значними ушкодженнями житлового фонду і промислових підприємств в Україні дана проблематика найбільш суттєва. Крім того, постійно змінюється склад і показники технічних засобів, які використовуються при виконанні будівельних робіт. До того ж у багатьох випадках додатково застосовуються джерела автономного живлення.

Певною складністю у процесі розроблення заходів зі зниження шуму будівельного обладнання є розбіжності у визначені значень шуму. Це пояснюється різними режимами роботи обладнання, а також відбиттям звукових хвиль від різних поверхонь, що потрібно враховувати у практичній діяльності.

Проведені інструментальні дослідження з використанням каліброваного шумоміра ОКТАВА 110 А дозволили отримати усереднені дані щодо шуму окремих агрегатів.



Асфальт, бетон	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,05	0,06	0,06
Невисока трава, рихлий ґрунт	0,10	0,33	0,40	0,80	0,80	0,80	0,80	0,70

Коефіцієнти звукопоглинання на будівельних майданчиках мають середні значення між наведеними у табл. 3.2 значеннями. Але вони впливають на рівні шуму на великих відстанях.

У табл. 3.3 представлено рівні звукового тиску у октавних смугах частот двох різних джерел шуму, які використовуються у будівництві.

Таблиця 3.3

Рівні звукового тиску обладнання з двигунами різного типу

Джерело шуму	Рівні звукового тиску, дБ						
	63	125	250	500	1000	2000	4000
Транспортна машина, бензиновий двигун	69	72	75	79	80	82	73
Пересувна компресорна станція, дизельний двигун	95	90	92	88	92	80	74

Амплітудно-частотні характеристики наведених джерел суттєво відрізняються у низькочастотній області. Для таких частот гранично допустимі рівні звукового тиску достатньо високі – 90–95 дБ. Відмінності на середніх і високих частотах не критичні, а значення звукового тиску не перевищують граничні значення. Для цих частотних смуг можливе зниження рівнів шуму акустичними екранами. За низьких частот звуку й високих амплітуд їх ефективність поступається ефективності резонансних та шумопоглинальним конструкціям. Але акустичні екрани мають низьку вартість, що надає можливість монтажу захисних конструкцій великих площ.

Звукоізолюючий ефект акустичного екрана визначається зоною акустичної тіні за ним. Тому розмір екрана є критичним для значення звукопоглинання,

особливо з відстанню від нього у захищеній зоні.

Зниження ефективності екранування з відстанню обумовлене дифракційними явищами на кромках екрана. Внесок дифракції збільшується зі зменшенням площі екрана, кута дифракції та довжини звукової хвилі. За великих кутів дифракції рівні звукового тиску можна знизити на 10–20 дБ. У середньо та високочастотній областях звукового спектра. У більшості випадків це буває достатньо для нормалізації рівня шуму.

Акустичні екрани найбільш ефективні у наступних випадках: переважність середньо та високочастотних складових шуму; невеликі розміри джерела шуму; відносно вузька спрямованість випромінювання звуку.

Усі відомі методи розрахунку акустичних екранів застосовують оптико-дифракційний підхід. Слід враховувати, що для великих кутів дифракції такий підхід дає значну похибку. Також не враховуються особливості розташування акустичних екранів у просторі, наявність відбиваючих поверхонь. Цей недолік можна подолати, додавши до відповідного рівняння ще один член.

Ефективність акустичного екрана у загальному випадку визначається як:

$$\Delta L = L_0 - L_e, \quad (3.1)$$

де  $L_0$  – рівень звукового тиску до екрана,

$L_e$  – у екранованій зоні, дБ.

Для вирішення інженерних задач для прямокутної конструкції прийнятну точність дає співвідношення:

$$\Delta L = -10 \lg \left( \tau + \sum_{i=1}^4 K_{\partial i} + \sum_{n=1}^N K_{en} \right) + 10 \lg \left( 1 + \sum_{n=1}^N K_{en} \right), \quad (3.2)$$

де  $\tau$  – коефіцієнт звукопровідності матеріалу екрана,

$K_{\partial i}$  – коефіцієнт дифракції  $i$ -тої кромки екрана,

$K_{en}$  – коефіцієнт відбиття  $n$ -ї поверхні,

$N$  – кількість відбиваючих поверхонь.

Розгляд кожної кромки екрана обов'язковий через те, що чотири боки конструкції можуть бути нерівноправними: наприклад, один бік розташований на поверхні і дифракція відсутня.

Коефіцієнт звукопровідності зв'язаний зі звукоізоляцією матеріалу екрана  $R$  (дБ) стандартним співвідношенням:

$$\tau = 10^{-0,1R}. \quad (3.3)$$

Коефіцієнт дифракції визначається співвідношенням:

$$K_{\partial i} = \frac{\gamma_i (10 - 3\varphi\alpha) h}{f \gamma_0 (r_i + l_i - r_0)}, \quad (3.4)$$

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,

$\alpha$  – коефіцієнт звукопоглинання матеріалу екрана,

$\gamma_0, \gamma_i$  – характеристики спрямованості джерела звуку, які визначаються значенням кута дифракції,

$f$  – кут між векторами  $R$  та  $l$ .

Параметр  $h$  визначається розташуванням екрана.

Експериментально встановлено, що  $h = l$  у разі, якщо відстань від поверхні до нижньої кромки екрана більша за 1,5 м. У інших випадках (відстань від 0 до 1,5 м) цей параметр дорівнює  $0,6 h$ . Частота звуку обирається  $f$  як середньгеометрична октавних смуг.

Для підвищення ефективності акустичних для різних умов можна сформулювати декілька вимог.

Якщо у спектрі шуму джерела переважають низькочастотні складові, то найбільш дієвими засобами підвищення ефективності екранів є – збільшення розмірів екранів; застосування екранів більш складної форми, наприклад, Г-подібної та П-подібної; зменшення відстані між джерелом шуму та екраном;

зменшення відстані між екраном та зоною, яка потребує захисту.

За наявності великої кількості відбиваючих поверхонь й переважно середньо та високочастотних складових шуму – облицювання поверхні екрана звукопоглинальним матеріалом; зміна кута відбиття звуку від усіх критичних поверхонь; зменшення ефективної площі відбиття; зменшення зазорів між відбиваючими поверхнями та екраном зміна розташування та форми екрана.

Не дивлячись на те, що вважається можливим досягнення зниження рівнів звукового тиску за допомогою акустичних екранів на рівні 18–20 дБ, у реальних умовах такі значення майже недосяжні. За площ акустичних екранів розумних розмірів та їх встановлення на прийнятних відстанях зниження рівнів звукового тиску складає 10–12 дБ. Цей факт необхідно врахувати у практичній діяльності й визначати потрібну ефективність акустичних екранів, виходячи з реальних умов розповсюдження звуку та принципу розумної достатності.

Відомо, що засоби екранування шуму та звукоізоляційні конструкції мають різні ефективності у залежності від амплітудно-частотних характеристик шуму. Тому було досліджено рівні шуму найбільш поширених джерел у октавних смугах частот.

Для визначення переліку та вмісту організаційно-технічних заходів зі зниження будівельного шуму необхідно виміряти фактичне значення рівнів шуму будівельної техніки. Ці вимірювання треба здійснювати принаймні у октавних смугах частот. Такі дані дозволяють більш коректно визначити засоби захисту, що обумовлене різними технічними рішеннями для екранування звуку різних частотних смуг. Результати вимірювання рівнів шуму типового обладнання, що використовується в процесах відновлювальних робіт, наведено у таблиці 3.4.

Таблиця 3.4

Рівні шуму технічних засобів, що використовуються на будівництві

Технічний засіб	Рівень звукового тиску, дБ, у октавних смугах із середньгеометричними частотами, Гц
-----------------	---

	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	$L_{екв}$ , дБА
Бетонозмішувач	101	96	90	88	91	87	78	74	72	86
Компресорна станція	104	95	92	93	94	97	95	92	91	94
Бетононасос	95	95	90	87	94	85	86	78	70	86
Вібромолот	95	102	97	101	99	102	101	98	92	98
Вібраційний брус	98	90	84	89	92	85	84	79	77	85
Екскаватор	102	94	90	88	87	92	90	87	78	90
Будівельний перфоратор	103	76	92	92	89	88	91	85	77	90

Відстань вимірювання складала 5 м. Як видно з наведених даних, рівні шуму перевищують гранично допустимі рівні як працюючих, так і для населення. При цьому шум кожного агрегату вимірювався окремо. За їх одночасної роботи еквівалентні значення зростуть. Відстань вимірювань невелика, але дані табл. 1 свідчать, що найвищі значення шуму припадають на низькочастотну область звукового спектра. Коефіцієнти згасання низькочастотного шуму незначні, тому він поширюється на великі відстані. В той же час засоби екранування такого шуму мають малу ефективність через великі довжини хвиль у цій області спектра.

Найбільш типовими потужностями дизельних генераторів є 34–55 кВт, бензинових – 2–4 кВт. У таблиці 3.5 наведено усереднені дані.

Таблиця 3.5

## Рівні шуму резервних електрогенераторів

	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	$L_{екв}$ , дБА
Дизельні	92	94	90	85	78	74	65	65	62	76
Бензинові	84	86	72	88	105	97	100	102	98	92

Наведені дані орієнтовні через усереднення показників по октавних смугах частот, але чітко простежуються певні закономірності. Рівні шуму бензинових генераторів набагато вищі за дизельні і в усіх випадках перевищують гранично допустимі рівні. При цьому для дизельних генераторів максимальні амплітудні звуки притаманні низькочастотній області звукового спектра.

Як зазначалося, для низькочастотної області звукового спектра доцільно використовувати резонансні захисні панелі. Для шуму середніх і високих частот доцільно використовувати звукопоглинальні матеріали й конструкції з них.

Якщо використовувати одношарову панель, то її проектування доцільно здійснювати за певним алгоритмом, тобто у наступній послідовності.

На сітці координат по осі абсцис наносяться значення звуку для критичної частоти й її гармонік –  $0,25f_c$ ;  $0,5f_c$ ;  $f_c$ ;  $2f_c$ . По осі ординат – звукоізоляція  $R$  або індекси зниження звуку  $\Delta L$ .

Для кожної з чотирьох частот – графічно отримуються значення  $R$  або  $\Delta L$ .

Отримані чотири точки з'єднуються й отримується крива ефективності панелі у децибелах на октаву.

Емпірична формула для визначення критичної частоти:

$$f_c = 0,55 \frac{v_0^2}{h v_m}, \quad (3.5)$$

де  $v_0$  – швидкість звуку у повітрі,

$v_m$  – швидкість звуку у матеріалі,

$h$  – товщина панелі.

Якщо є потреба одночасної звукоізоляції у звуковому діапазоні та інфразвуковому діапазоні, то панель робиться двошаровою. При цьому друга панель (для інфразвуку) розташовується позаду першої відносно променів розповсюдження шуму. У цьому випадку відстань між панелями можливо обрати

такою, яка буде відповідати одній чверті звукової хвилі найбільшою амплітуди, що різко підвищить ефективність шумозахисту. Для підвищення ефективності конструкції проміжок між панелями доцільно заповнити шумопоглинальним неоднорідним матеріалом, наприклад, гранульованим пінополістиролом. Для екранування звуку електрогенераторів доцільно застосовувати конструкцію у формі паралелепіпеда. Єдиним обмеженням є необхідність забезпечення вентиляції та газовідводу від генератора.

Наведена оцінка визначення критичної частоти дещо приблизна, що можна пояснити дуже широким спектром реальних амплітудних характеристик шуму і інфразвуку об'єктів будівництва. Рівні шуму таких об'єктів наведено у таблиці 3.6.

Таблиця 3.6

Рівні шуму будівельних майданчиків на відстані 100 м

31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
85–100	80–95	75–95	75–90	73–86	64–75	70–75	65–78	72–80

Отримані дані свідчать, що еквівалентний рівень шуму досягає значення 85 дБА. Аналогічні вимірювання були виконані для щодо рівнів інфразвуку у третинооктавних смугах частот.

Таблиця 3.7

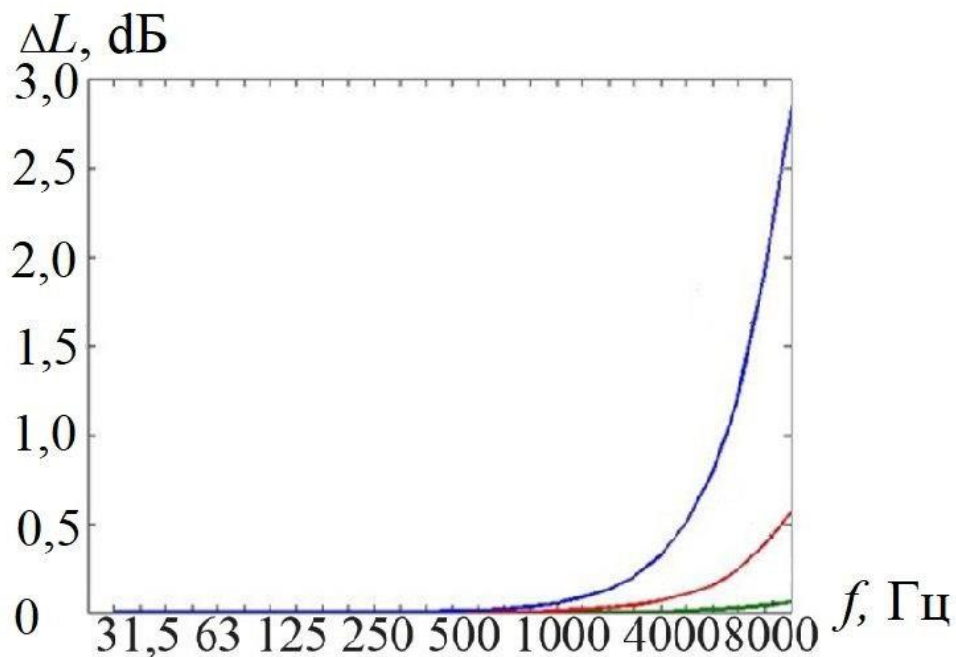
Рівні інфразвуку будівельних майданчиків на відстані 100 м

1,6	2,0	2,5	3,15	4,0	5,0	6,3	8,0	10,0	12,5	16,0
80–115	82–108	76–105	77–98	72–94	60–90	72–82	68–77	90–98	70–78	75–85

Отримані дані свідчать що еквівалент значення інфразвук досягають значення 94 дБ за лінійною шкалою. Наведене свідчить про необхідність застосування шумозахисних конструкцій в умовах виконання робіт на території населених місць зі щільною забудовою.

### 3.2. Розроблення та визначення ефективності засобів зниження рівнів будівельного шуму та інфразвуку

Необхідність застосування захисних конструкцій для зниження рівнів шуму та інфразвуку та отримання новітніх звукоізоляційних матеріалів обумовлена низьким згасанням рівнів шуму у повітрі (рис. 3.1).



**Рис. 3.1.** Амплітудно-частотні характеристики згасання шуму з відстанню від джерела: — — 10 м, — — 100 м, — — 600 м.

При цьому згасання інфразвуку на таких відстанях перебуває на межі чутливості шумоміра. Зазвичай для зниження рівнів шуму використовують шумозахисні екрани, але такі конструкції ефективні за великих розмірів. У

реальних міських умовах розміри екранів кінцеві порівняно з довжинами хвиль. Тому були проведені дослідження щодо ефективності шумозахисних екранів у залежності від розмірів та відстаней.

У загальному випадку зниження рівнів звукового тиску з відстанню визначається співвідношенням:

- для сферичних акустичних хвиль

$$\Delta L(r) = 20 \lg r, \quad (3.6)$$

- для циліндричних акустичних хвиль:

$$\Delta L(r) = 10 \lg r. \quad (3.7)$$

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:

$$\Delta L(f) = \alpha(f)r, \quad (3.8)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт поглинання звуку у повітрі,

$f$  – частота звукової хвилі.

Загальновизнаною практикою є визначення  $\alpha$  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:

$$\Delta L = -10 \lg \left( \tau + \sum_{i=1}^4 K_{\partial i} + \sum_{n=1}^N K_{en} \right) + 10 \lg \left( 1 + \sum_{n=1}^N K_{en} \right), \quad (3.9)$$

де  $\tau$  – 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:

$$\tau = 10^{-0,3R}. \quad (3.10)$$

Цей параметр для більшості стандартних матеріалів є довідковим.

Коефіцієнт дифракції розраховується як:

$$K_{\partial i} = \frac{\gamma_i (10 - 3\varphi\alpha) h}{f \gamma_0 (r_i + l_i - r_0)}, \quad (3.11)$$

де  $r_0$  – відстань від джерела звуку до точки визначення звуку за екраном,

$r_i$  – відстань від джерела звуку до відповідної кромки екрана,

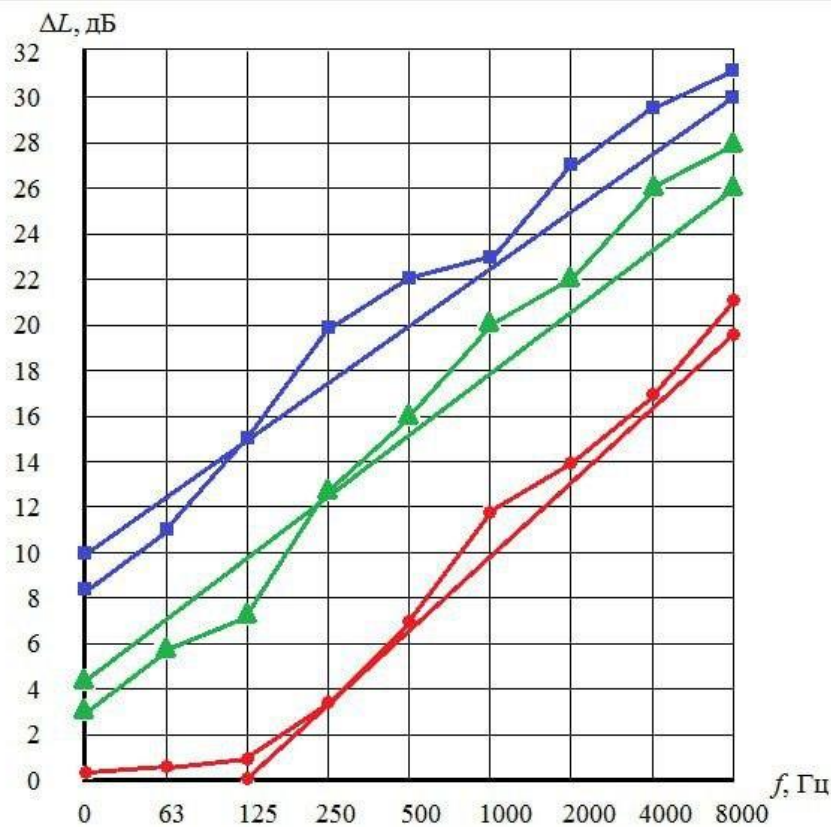
$l_i$  – відстань від кромки екрана до точки визначення звуку за екраном,

$\alpha$  – коефіцієнт звукопоглинання матеріалу екрана,  $\gamma_0, \gamma_i$  – характеристики спрямованості джерела звуку, які визначаються значенням кута дифракції,

$f$  – 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.

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. Результати дослідження наведено на рис. 3.2.



**Рис. 3.2.** Залежність індексів зниження шуму від площі тонкого шумозахисного екрана:  
 — — 12 м<sup>2</sup>, — — 6 м<sup>2</sup>, — — 3 м<sup>2</sup>,  
 ламана крива – експеримент, пряма – розрахунок

Усі екрани мали прямокутну форму однакових пропорцій довжини й ширини. Як видно з рис. 3.2, 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.

Але у багатьох випадках при більш детальному розгляді ефективності пласких екранів спостерігається неоднозначність, тобто на меншій відстані у низькочастотній області більше проявляється інтерференційні явища (табл. 3.8).

Таблиця 3.8

Індекси зниження шуму у октавних смугах частот за різних відстаней між джерелом та приймачем звуку

$\Delta L$ , дБ								
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
4 м	-6	-5	0	12	17	10	17	18
100 м	-3	4	18	15	13	12	20	24

При цьому прогнозування індексів зниження шуму для різних моделей поширення шуму й розрахунку зниження його рівнів дає деякі розбіжності (табл. 3.9).

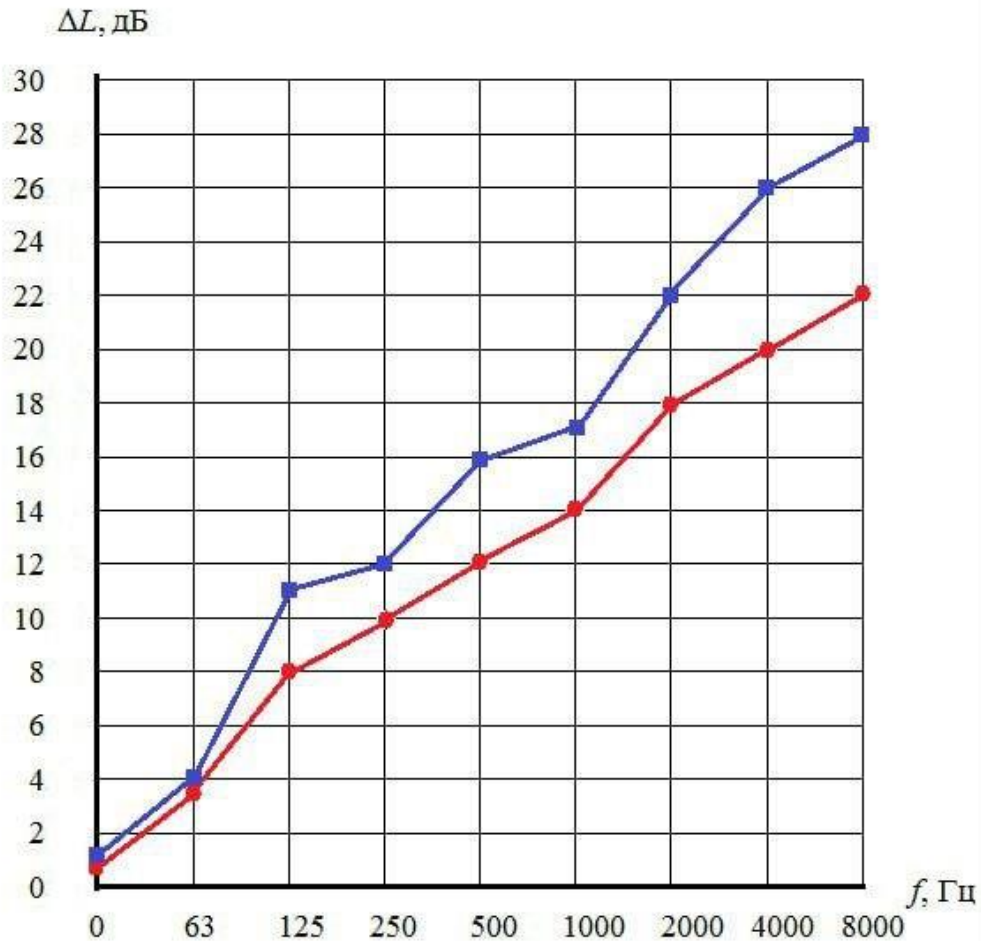
Таблиця 3.9

Прогнозування індексів зниження шуму акустичними екранами кінцевих розмірів за різними моделями

$\Delta L$ , дБ								
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Модель 1	-7	-2	0	15	25	5	22	20
Модель 2	-2	0	2	15	25	5	10	18

Наведені моделі є найпоширенішими. Проте, враховуючи деякі розбіжності необхідно внести певні зміни у методологію прогнозування ефективності акустичних екранів в умовах обмежених просторів.

У багатьох випадках шумозахисні конструкції мають технологічні отвори. Найбільш це стосується виробів подвійного призначення – парканів, огорожувальних конструкцій тощо. Було досліджено ефективність тонкої захисної конструкції суцільної структури та кількома отворами (рис. 3.3).



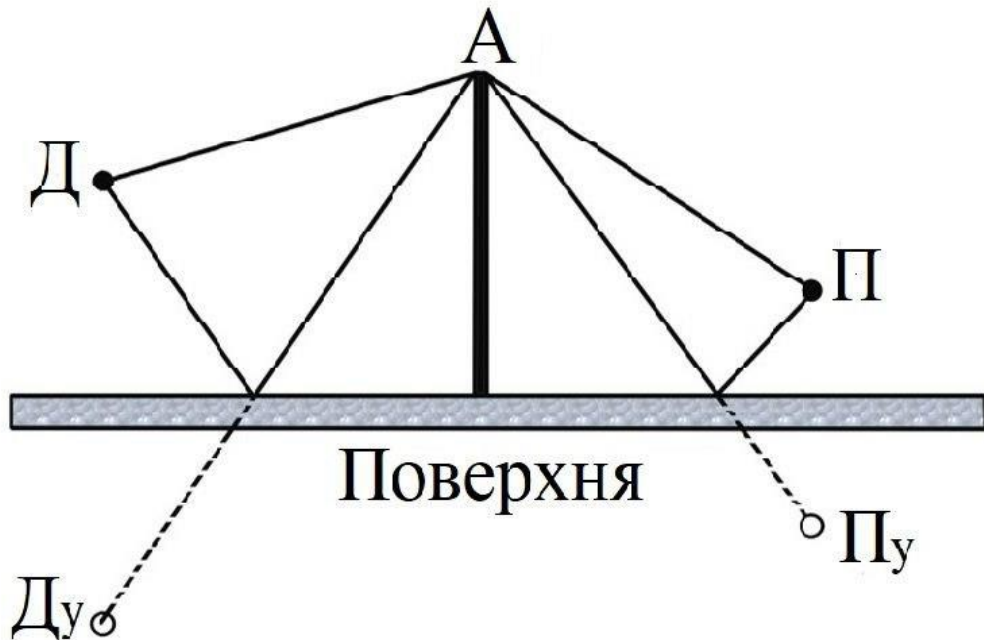
**Рис. 3.3.** Залежність індексів зниження шуму захисною конструкцією від наявності отворів: — без отвору, — з отвором

Як видно з рис. 3.3, 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 можна розраховувати параметри отворів, які забезпечують підвищення звукопоглинання низькочастотної складової шуму.

Як зазначалося, в умовах обмежених просторів критичною є відстань від

шумозахисного екрана до приймача звуку.

На малих відстанях дуже критичним є накладання відбитих та дифрагованих хвиль (рис. 3.4).



**Рис. 3.4.** Схема проходження звуку навколо тонкого акустичного екрана:

Д – джерело шуму, П – приймач, Ду, Пу – уявні джерело та приймач шуму

Було визначено індекси зниження шуму у октавних смугах частот у залежності від відстані приймача до тонкого екрана (табл. 3.10)

Таблиця 3.10

Залежність індексу зниження шуму від відстані до тонкого екрана

l, м	$\Delta L$ , 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

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. У практичній роботі проєктування 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.

Встановлено, 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.

Найбільш складним є зниження рівнів низькочастотного звуку та інфразвуку. Проектування таких конструкцій доцільно здійснювати з урахуванням багатьох критичних факторів.

Обирання геометричних характеристик і параметрів звукоізолюючих конструкцій повинне здійснюватися з урахуванням певних загальних вимог. Це обумовлюється, у першу чергу, необхідністю забезпечення стабільної роботи механізму, який є джерелом звуку, тобто його основної функції. Вимоги щодо проектування захисної конструкції можна умовно розділити на три групи:

- Застосування звукоізолюючої конструкції не повинне змінювати основні робочі параметри пристроїв або технологічних процесів. Такі зміни повинні перебувати принаймні у допустимих межах.
- Параметри звукоізолюючих конструкцій повинні забезпечувати достатні, з точки зору охорони праці і безпеки життєдіяльності, коефіцієнти звукоізоляції.
- Технології виготовлення звукоізоляційних конструкцій повинні бути прийнятними з точки зору витрат часу і коштів, тобто мати прийнятну вартість порівняно з ефективністю застосування самого механізму.

Кожна з цих вимог узагальнена, а пріоритетність визначається у закономірності від специфіки виробничого процесу, умов експлуатації, кількості людей, задіяних у виробничому процесі тощо.

Наприклад, перша вимога може обумовлювати необхідність оцінки зворотнього впливу звукоізолюючої конструкції на працездатність чутливих механізмів електронних пристроїв через формування вторинного акустичного поля. Також слід враховувати, що наявність технологічних отворів може суттєво знижувати ефективність захисної конструкції. Незамкнені конструкції неефективні

в області низьких частот. Найбільш прості у виготовленні конструкції – циліндричні, плоскі, не потребують розроблення спеціальних технологій виготовлення, але повітряні проміжки між механізмом і стінкою захисної конструкції сприяють появі резонансних явищ, що знижує загальну звукоізоляцію.

Головними вихідними даними у процесі проектування звукоізоляції є конструкція, кінематичні динамічні характеристики виробничих процесів, режими роботи, відомості про необхідність постійного або періодичного доступу до механізмів, розташування робочих місць, шумові характеристики та потрібний ступінь звукоізоляції.

Шумовими характеристиками механізмів є рівень звукової потужності  $L_p$  та рівень звукового тиску  $L$  на поверхні  $S_p$ , яка проходить крізь робоче місце або робочу зону. Вони зв'язані між собою співвідношенням:

$$L_p = L + 10 \lg S_p, \quad (3.12)$$

Головною вимогою для коректного визначення потрібної ефективності звукоізоляції є ідентифікація джерел звуку. Вона здійснюється шляхом розрахунків або вимірюванням. Останнє обов'язково здійснювати у октавних (третинооктавних) смугах частот.

Потрібна величина звукоізоляції  $R$  визначається як:

$$R = L - L_\partial + 5,$$

$$R = L_p - L_\partial - 10 \lg S_p + 5, \quad (3.13)$$

де  $L_\partial$  – допустимі рівні шуму.

Додаток 5 дБ вважається припустимою розбіжністю звукоізоляції у різних

частинах конструкції.

Застосування звукоізолюючих конструкцій на низьких частотах особливо актуальне через те, що застосування традиційних засобів зниження шуму – екранів та вигоронок не є ефективним. Крім того, у цьому діапазоні більшість механізмів випромінює звук на дискретних частотах, пов'язаних з резонансами окремих частин механізму. Це має певну небезпеку: якщо резонансна частота однієї зі стінок захисної конструкції збігається з частотою збудження, то рівні звуку за межами захисної конструкції підвищується. Таке явище визначено за результатами натурних вимірювань рівнів низькочастотного звуку.

Оцінювання ефективності зниження рівнів звуку низьких частот значно спрощується у випадку, коли максимальні розміри механізму і захисної конструкції менші за довжину хвилі у повітрі. У цьому випадку джерело генерує високі рівні звуку за відмінної від нуля об'ємної швидкості.

$$V(t) = \int_S \bar{v}(r_0, t) d\bar{S}, \quad (3.14)$$

де  $\bar{v}$  – вектор коливальної швидкості поверхні  $S$  випромінювача у точці  $r_0$ ,  
 $d\bar{S}$  – вектор елемента поверхні, спрямований по нормалі до неї.

На великих відстанях  $r$  від джерела головною складовою звукового поля буде сферично-симетрична хвиля, яку створила б пульсуюча сфера малого радіусу з об'ємною швидкістю  $V(t)$ . Звуковий тиск  $p$ , який створює мале пульсуюче тіло на відстані  $r$ .

$$p(r) = -i\rho_n \omega V_0 \frac{e^{-ikr}}{4\pi r}, \quad (3.15)$$

$\rho_n$  – густина повітря,

$\omega = 2\pi f$  – циклічна частота,

$k$  – хвильове число у повітрі,

$V_0$  – амплітуда об'ємної швидкості.

А ефективність зниження рівня звуку конструкцією:

$$R = 20 \lg \left| \frac{P_m}{P_k} \right|, \quad (3.16)$$

де  $P_m$  та  $P_k$  – амплітуди звукового тиску відкритого та ізольованого механізму.

На низьких частотах, у тому числі і інфразвукових, ефективними є резонансні панелі. Це пласкі панелі, позаду яких є повітряний проміжок. Для підвищення загального шумопоглинання він може бути заповнений покритим поглиначем. Це тонка панель з будь-якого пружного матеріалу, розташована на деякій відстані від поверхні монтажу (стіни). Панель є чистою масою, а повітряний проміжок забезпечує пружність. Резонансна частота панелі визначається як:

$$f_p = 0,16c \sqrt{\rho / md}, \quad (3.17)$$

де  $c$  – швидкість звуку у повітрі,

$\rho$  – густина повітря,

$m$  – питома поверхнева маса,

$d$  – товщина повітряного проміжку.

У випадку дифузного падіння пружної хвилі приблизне значення резонансної частоти:

$$f_p = 85(md)^{\frac{1}{2}}, \quad (3.18)$$

Для зниження рівнів інфразвуку доцільно застосовувати мембранні поглиначі енергії. Вони є конструкцією, у якій гнучкий матеріал натягнутий на жорсткий каркас. Резонансна частота таких конструкцій визначається зі співвідношення:

$$f_p = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{F}{\rho t l^2 b}}, \quad (3.19)$$

де  $F$  – сила тяжіння мембрани;

$\rho$  – густина матеріалу;

$l, t, b$  – довжина, товщина та ширина мембрани.

Недоліком такого поглинача є те, що він не може бути універсальним. Його розміри завжди прив'язані до розмірів поверхні приміщення і розраховуються, виходячи з частоти переважної амплітуди. Тобто, знаючи найбільш критичну частоту, визначають інші параметри конструкції, які можуть бути змінені і забезпечувати поглинання коливань потрібної частоти.

Головними недоліками наведених вище співвідношень є те, що вони емпіричні. Це обумовлює певні розбіжності з експериментом. При цьому резонансні конструкції ефективні на одній частоті, в той час як критичних частот може бути декілька. Тому у процесі проектування звукоізолюючої конструкції доцільно передбачити наявність ще однієї панелі, паралельної першій, але налаштованої на іншу резонансну частоту. Якщо цю панель зробити перфорованою, то добротність коливальної системи знижується, тобто резонансна крива стає ширшою. Це робить панель певним чином широкосмуговою. Резонансна частота перфорованої панелі розраховується зі співвідношення:

$$f_p = \frac{v}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{t_{ef} dh}}, \quad (3.20)$$

де  $v$  – швидкість звуку у повітрі,

$t_{ef}$  – ефективна товщина панелі,

$t_{ef} = t + 0,5\sqrt{\pi S}$ ,  $t$  – товщина матеріалу панелі,

$S$  – переріз одного отвору,

$d$  – відстань між центрами отворів,

$h$  – відстань від панелі до поверхні монтажу.

Якщо проміжок між панелями заповнити шумопоглинальним матеріалом, наприклад, гранульованим пінополістиролом, то забезпечується зниження рівнів шуму в усьому звуковому діапазоні.

Найбільш типовими джерелами акустичного шуму у промисловості є шум електричних машин та механізмів.

Шум електричних машин визначається трьома складовими:

- магнітний шум, який створюється коливаннями статора і ротора під впливом внутрішніх магнітних полів;
- аеродинамічний шум, генерований рухом повітряних потоків всередині машини;
- механічний шум, обумовлений вібрацією деталей та вузлів машин від невірноваженості ротора, роботи підшипників та щіток.

У тихоходних машинах, які здебільшого генерують низькочастотний звук, переважає магнітний шум.

Наприклад, для електричних машин загальнопромислового призначення потужностями 1–100 кВт для відстані від машини 0,5 м існує наближене співвідношення для визначення рівня шуму  $L$ :

$$L = 10 \lg N + 20 \lg n + l_0. \quad (3.21)$$

де  $N$  – номінальна потужність електричної машини,  
 $n$  – частота обертання.

Ця залежність стосується асинхронних двигунів та машин постійного струму.

Натурні вимірювання свідчать, що у низькочастотній області звукового спектра (до 500 Гц) складають для електродвигунів до 70 дБ з яскраво вираженими переважними частотами, що дозволяє застосовувати резонансні панелі. Для дизельних двигунів цей параметр досягає 100–120 дБ також з піковими частотами. Ці частоти для проектування резонансних панелей необхідно визначити експериментально у кожному окремому випадку.

Але наведений підхід до проектування засобів захисту від низькочастотного шуму має концептуальний характер. На практиці цими співвідношеннями складно користуватися через наявність параметрів, які не є довідковими. Тому доцільно розробити розрахунковий апарат більш придатний у прикладному застосуванні. Крім того у процесі відновлення будівель зі значними ушкодженнями доцільно передбачити й шумозахисні заходи для самих будівель.

### **3.3 Засоби прогнозування ефективності матеріалів і конструкцій для зниження рівнів шуму та інфразвуку**

Значна частина будівель в Україні має великі терміни експлуатації і не відповідає сучасним вимогам щодо захисту від шуму. В усьому світі велика кількість історичних будівель і об'єктів історичної спадщини потребують відновлення і проведення ремонтних робіт. Зокрема в Україні в результаті бойових дій та терористичних атак, велика кількість таких будівель потребує повного або часткового відновлення. На рисунку 3.5 наведено, що в будівлях є руйнування зовнішніх конструкцій, так і внутрішнього облицювання. У процесі відновлення доцільно забезпечити сучасні акустичні характеристики усієї конструкції з урахуванням акустичного навантаження середовища міст. Усі історичні будівлі є

нестандартними, тому потребує розроблення методологія проектування шумозахисних конструкцій та матеріалів потрібної ефективності.



**Рис. 3.5.** Перша українська гімназія імені Миколи Аркаса, м. Миколаїв, заснована у 1863 р.

Захист від впливу низькочастотного звуку та інфразвуку є найбільш складною задачею забезпечення акустичних характеристик будівель та приміщень. Це пояснюється низьким згасанням низькочастотних коливань у повітрі та будівельних конструкціях. Тому найбільш ефективним засобом зниження рівнів такого звуку є застосування захисних панелей, які забезпечують резонансне

поглинання енергії звукових хвиль. Таке поглинання забезпечується за рахунок згинних коливань панелі, яке досягає максимуму на критичній частоті.

З теорії взаємодії звуку з поверхнями відомо, що критична частота коливань панелі, за якої швидкість поширення згинних хвиль у панелі збігається зі швидкістю поширення звукових хвиль у повітрі,  $f_k$  визначається як:

$$f_k = \frac{v_0}{2\pi} \sqrt{\frac{m}{D}}, \quad (3.22)$$

де  $v_0$  – швидкість звуку у повітрі,

$m$  – погонна маса панелі,

$D$  – циліндрична жорсткість панелі.

При цьому  $m = \rho_m h$ , де  $\rho_m$  – густина матеріалу панелі,  $h$  – товщина панелі.

Практичне значення має визначення густина власних частот панелі кінцевих розмірів, яка визначає максимальну ефективність поглинання звуку  $n(f)$ :

$$n(f) = \frac{l_x l_y}{4\pi} \sqrt{\frac{m}{D}}, \quad (3.23)$$

де  $l_x l_y$  – лінійні розміри панелі.

Наявність кількісних даних, отриманих з формул (3.22) і (3.23) дозволяє визначити параметри панелі, які забезпечують максимальне поглинання звукових хвиль внаслідок втрат енергії на збудження коливань у панелі.

Для зниження рівнів звуку можливо застосовувати й пористі звукопоглинальні конструкції, що широко застосовуються на практиці. Але для інфразвукових коливань та низькочастотного звуку з великими довжинами хвиль зниження їх рівнів можливо виключно за рахунок резонансного поглинання хвиль.

Усі панелі для зниження рівнів інфразвуку та низькочастотного звуку є різновидами панелі Бекеші. Їх ефективність максимальна на резонансних частотах,

якими обираються частоти максимальної амплітуди, визначені експериментально.

$$f_r = \frac{k}{2l} \sqrt{\frac{F}{\rho b h}}, \quad (3.24)$$

де  $F$  – сила натягнення матеріалу,

$\rho$  – густина матеріалу,

$l, b, h$  – довжина, ширина і товщина матеріалу,

$k$  – порядок резонансної частоти.

Виходячи з цього і визначаються технічні параметри панелі. Але практичне використання співвідношення (3.24) незручне. Сила натягнення панелі залежить від її лінійного розміру, а густини матеріалів, виготовлених у вигляді листів або рулонів, не є довідковими величинами. Зазвичай у документації фігурують поверхневі або погонні величини – маса одиничної площі поверхні. Тобто це є значення  $m = \rho_m h$ , яке вимірюється у  $\text{кг}/\text{м}^2$ .

Замість невизначеного параметра  $F$  доцільно застосовувати такий показник, як циліндрична жорсткість панелі  $D$ , яка вимірюється у  $\text{Н}\cdot\text{м}$ , тобто навантаження на одиницю довжини панелі.

У цьому випадку:

$$f_r = \frac{k}{2l} \sqrt{\frac{D}{m b h}}. \quad (3.25)$$

Перевагою такого розрахунку є те, що значення  $D$  можна розрахувати для будь-якого матеріалу, виходячи зі співвідношень механіки суцільних середовищ:

$$D = \frac{E h^3}{12(1 - \mu^2)}, \quad (3.26)$$

де  $E$  – модуль Юнга,

$\mu$  – коефіцієнт Пуассона.

Таким чином:

$$f_r = \frac{k}{2l} \sqrt{\frac{Eh^2}{12mb(1-\mu^2)}}. \quad (3.27)$$

Значення  $E$ ,  $\mu$ ,  $m$  є довідковими для стандартного матеріалу, тому для налаштування панелі на потрібну частоту  $f_r$  здійснюється змінами параметрів  $l$ ,  $b$ ,  $h$ . Якщо, приклад, потрібна панель розмірами  $l \times b$ , то з номенклатури виробів обирається матеріал потрібної товщини. Якщо задовільний результат не досягається, то обирається інший матеріал з іншими значеннями пружних модулів.

Аналогічно і співвідношення (3.22), (3.23) доцільно використовувати у вигляді:

$$f_k = \frac{v_0}{2\pi} \sqrt{\frac{12m(1-\mu^2)}{Eh^3}}, \quad (3.28)$$

$$n(f) = \frac{l_x l_y}{4\pi} \sqrt{\frac{12m(1-\mu^2)}{Eh^3}}. \quad (3.29)$$

Уніфікація розрахункових параметрів надає можливість розробляти захисні панелі прийнятних ефективностей для частот звукового діапазону та інфразвуку. Акустичні характеристики будь-яких джерел дуже відрізняються як за переважними частотами (частотними смугами) звуку, так і за рівнями інфразвуку. Тому у практичній діяльності на основі вимірювання спектральних характеристик визначаються найбільш критичні смуги частот з точки зору необхідності зниження амплітуд значень звуку та інфразвуку. Тобто, проектування захисної панелі

здійснюється виходячи з принципу пріоритетності. У конструктивні рішення, у тому числі й обирання матеріалу панелі, закладається максимальне зниження коливань найбільших амплітуд.

У разі неможливості прийнятного зниження звуку та інфразвуку доцільно виготовити двошарову панель. Одна з них проєктується для екранування звуку переважних частот та частотних смуг, друга – для зниження рівнів інфразвуку.

Налаштування панелі для екранування інфразвуку та низькочастотного звуку на резонансну частоту має недоліки. Висока добротність коливальної системи робить панель вузькосмуговою. У разі потреби отримання широкої смуги поглинання низькочастотних коливань необхідно знизити добротність коливальної системи, якою є панель. Для цього на панелі робляться отвори. Центральна частота переважного поглинання розраховується зі співвідношення:

$$f = \frac{v_0}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{h_{eff} c^2 d}}, \quad (3.30)$$

де  $S$  – площа отворів,

$h_{eff}$  – ефективна товщина панелі ( $h_{eff} = h + 0,5\sqrt{\pi S}$ ),

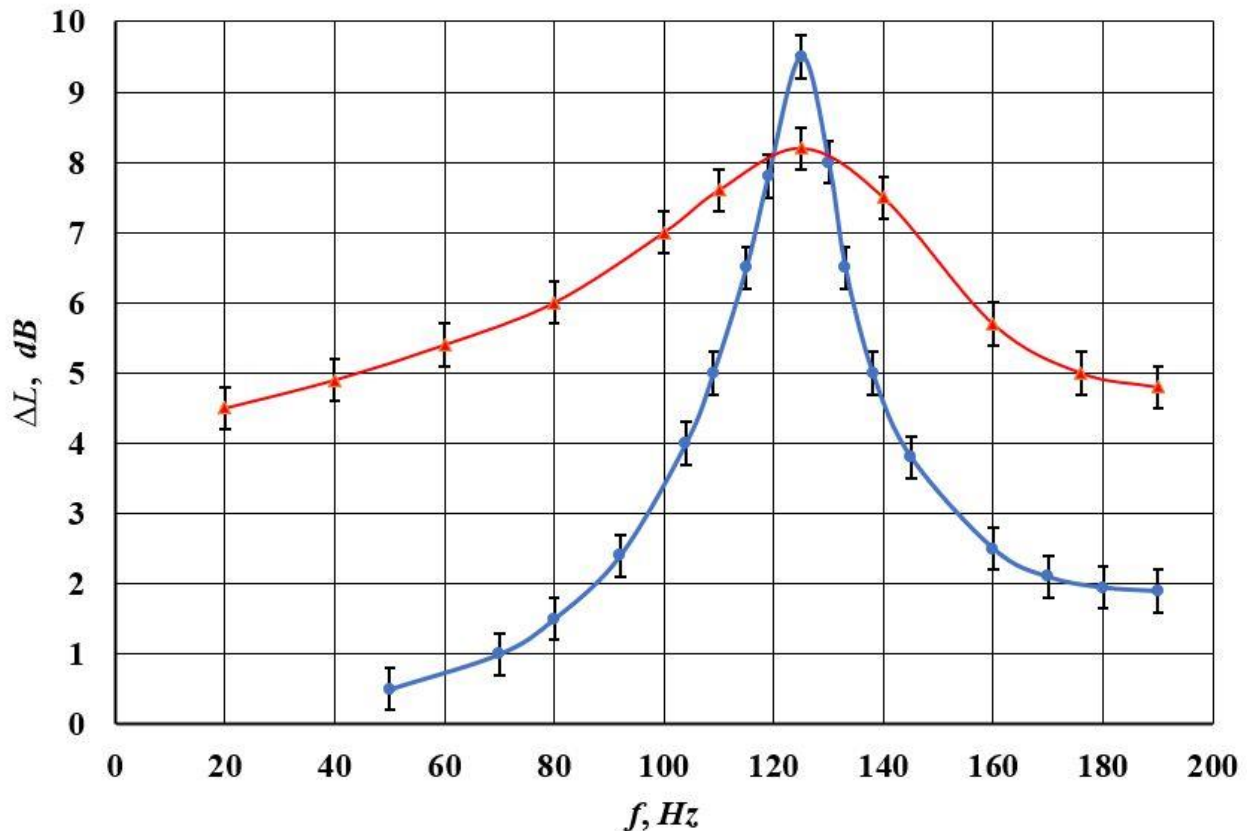
$h$  – товщина панелі,

$c$  – відстань між центрами отворів,

$d$  – відстань від панелі до поверхні монтажу панелі.

Для двошарової панелі відстань  $d$  є відстанню між панелями. За такої конструкції досягається одночасне зниження рівнів звукового діапазону та інфразвуку. Слід враховувати, що з віддаленням частоти від резонансної та критичної ефективність екранування знижується. Отримати узагальнені криві, які характеризують добротність усіх панелей не можливо. Вони різні для кожного окремого випадку, і визначаються як характеристиками матеріалу панелі, так і її геометричними параметрами.

Проведено порівняння ефективності екранування резонансними панелями низькочастотного звуку. Обидві панелі були налаштовані на резонансну частоту 125 Гц.

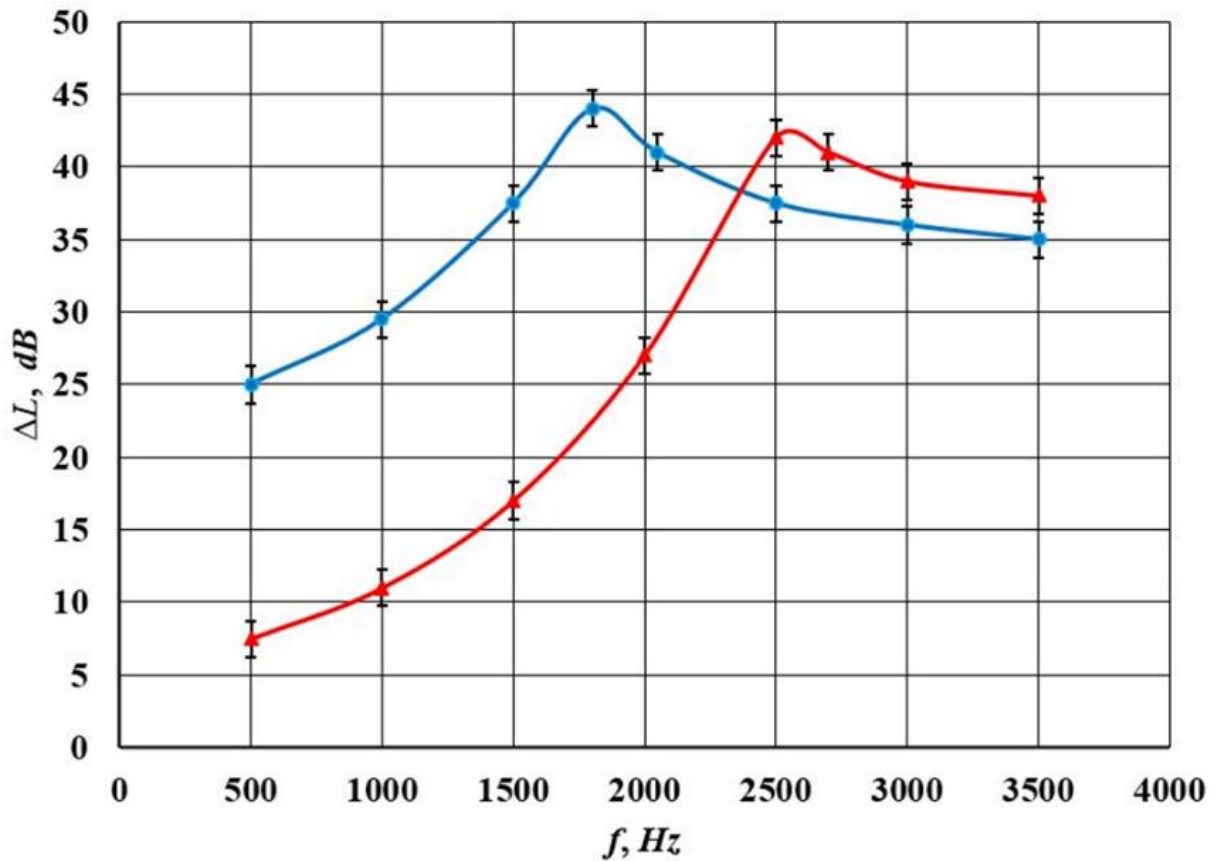


**Рис. 3.6.** Індеси зниження звуку низьких частот резонансними панелями:

—●— суцільна панель; —▼— перфорована панель

Як видно з рисунка 3.6, перфорована панель є широкопasmовою. Індеси зниження шуму 4 дБ і вище для низькочастотної області можна вважати задовільними через високу проникність низькочастотних коливань. Суцільні панелі доцільно застосовувати для екранування низькочастотного шуму з великою амплітудою на певній частоті або у вузькій смузі частот.

Проведено вимірювання зниження рівнів шуму панелями для екранування звуку середніх частот. Конструкції панелей спроектовані для критичних частот 1800 та 2500 Гц.

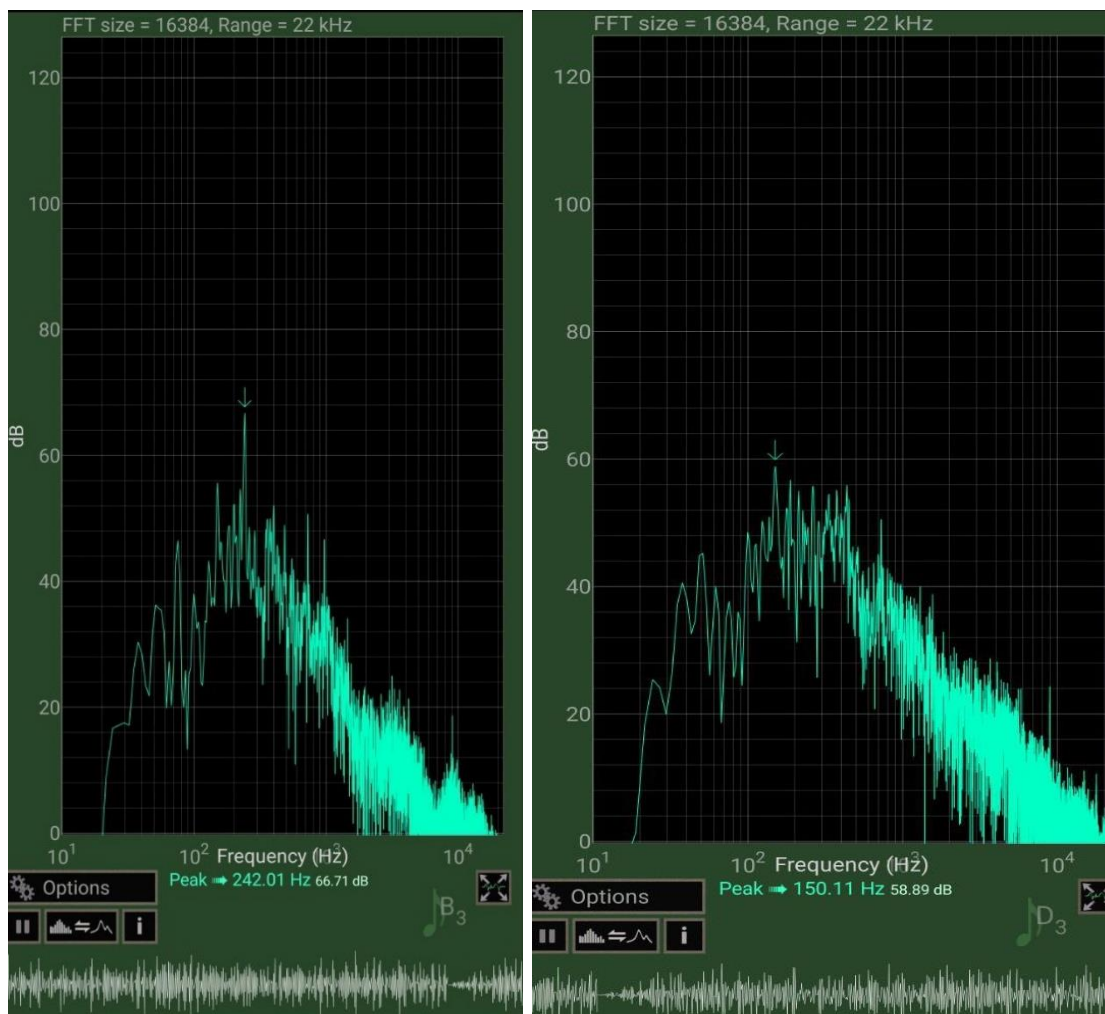


**Рис. 3.7.** Індеси зниження звуку середніх частот захисними панелями;  
● критична частота 1800 Гц; ▲ критична частота 2500 Гц

Як видно з рисунка 3.7, характер кривих індесів зниження шуму однаковий. При цьому ефективність панелей істотно вища для частот, більших за критичну. Тому у процесі проектування шумозахисту необхідно враховувати межі ефективностей панелей для частот, нижчих за критичну. Тобто, у процесі розрахунків панелей у якості критичної частоти слід обирати частоту найвищої амплітуди з урахуванням амплітуд частот, нижчих за критичну. Це можливо варіаціями як розмірів панелі, так і за рахунок вибору матеріалу з прийнятними пружними модулями й поверхневою густиною.

Для максимальної ефективності резонансної панелі необхідно точно знати частоту налаштування. Нормативні методи визначення спектрального складу звуку та інфразвуку у октавних та третинооктавних смугах частот не надають такої інформації. Тому доцільно здійснювати вимірювання неперервного спектра шуму. Це можливо із застосуванням програм аналізу частотного спектра, наприклад

Спектрограм та ін. (рис. 3.8).

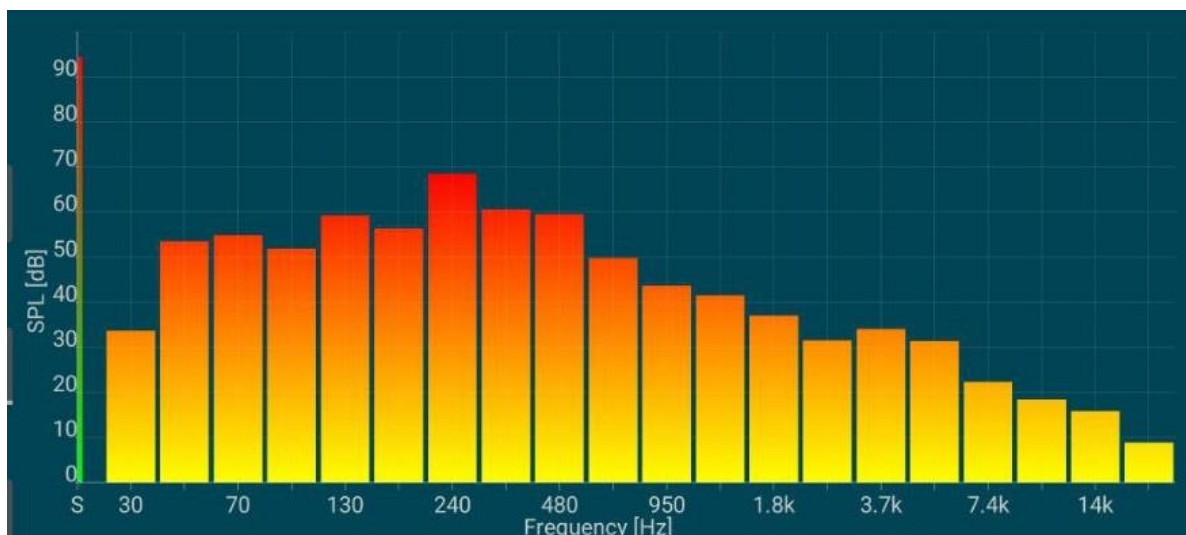


*a)*

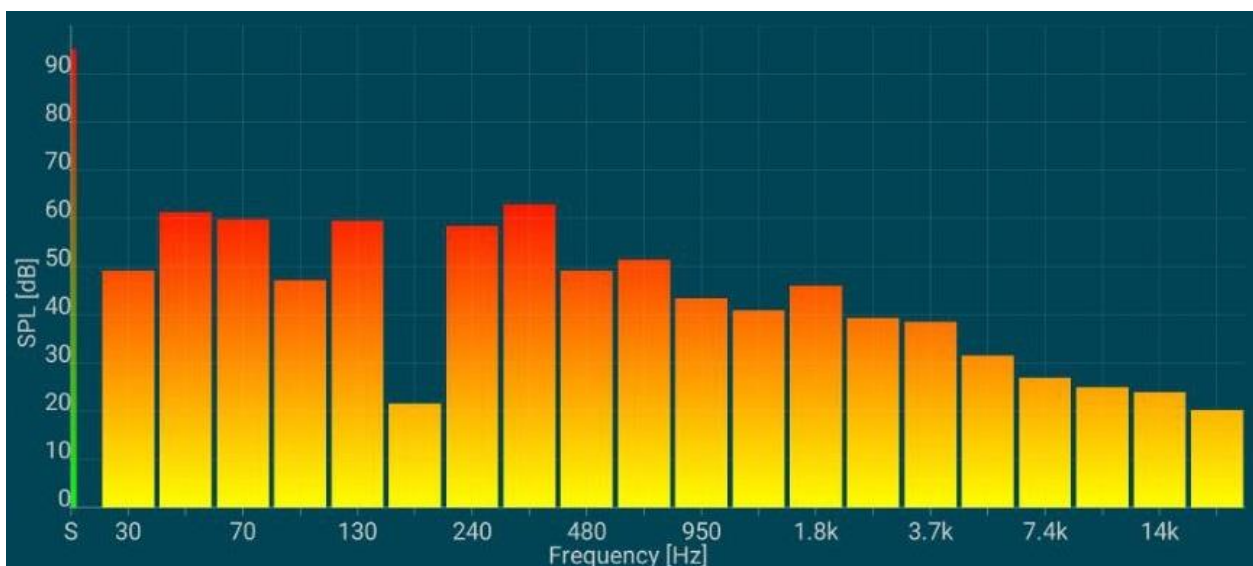
*б)*

**Рис. 3.8.** Спектри шуму дизельних електрогенераторів

Як видно з рис. 3.8 максимальні амплітуди шуму припадають на різні частоти. Тому у практичній діяльності необхідно вимірювати типові спектри однотипного обладнання для створення захисної панелі або для кожного окремого випадку індивідуально. Наведені спектри достатньо складні. Тому такий графічний матеріал можна отримати у спрощеному вигляді.



a)



б)

**Рис. 3.9.** Спектри шуму електрогенераторів

Як видно з наведених рисунків для прийнятної ефективності панель повинна бути достатньо широкосмуговою, принаймні до частот звуку 500 Гц. Аналогічним чином проєктуються конструкції для зниження рівнів інфразвуку.

Загальним недоліком панелей усіх типів і конструкцій є прийнятна ефективність щодо зниження рівнів шуму за умови їх розташування на плоских поверхнях. Тому їх доцільно застосовувати для облицювання поверхонь великих зал, спеціалізованих приміщень, а також приміщень з високими рівнями

інфразвуку та низькочастотного звуку. Крім того, на середніх і високих частотах ефективність панелей може бути незадовільною. Відомо, що найбільш ефективними матеріалами для зниження рівнів шуму є пористі звукопоглинальні матеріали. Існує проблема проектування звукопоглинальних і звукоізоляційних покриттів для визначеної акустичної обстановки. Тому доцільним є розроблення прийняттого математичного апарату для проектування захисних покриттів з необхідними коефіцієнтами поглинання звуку. Коефіцієнт поглинання може бути, зокрема, розрахований за допомогою моделі Delany-Bazley, параметром якого є питомий опір повітряному потоку:

$$\sigma = \frac{\Delta P}{V \times d}, \quad (3.31)$$

де  $\Delta P$  – різниця тиску з двох боків матеріалу;

$V$  – швидкість повітряного потоку за межами зразка;

$d$  – товщина пористого шару.

Коефіцієнт поглинання звуку  $\alpha$  визначається виразом:

$$\alpha = 1 - |R|^2, \quad (3.32)$$

де  $R$  – коефіцієнт відбиття:

$$R = \frac{Z_s - \rho_0 c_0}{Z_s + \rho_0 c_0}, \quad (3.33)$$

де  $\rho_0$  – густина повітря;

$c_0$  – швидкість звуку в повітрі;

$Z_s$  – поверхневий імпеданс:

$$Z_s = -iZ_c \cot(k_c d). \quad (3.34)$$

$i$  – уява одиниця,

$Z_c$  – характеристичний імпеданс,

$k_c$  – постійна поширення,

$d$  – товщина пористого шару;

$$Z_c = \rho_0 c_0 \left[ 1 + 0,0571 \left( \frac{\rho_0 f}{\sigma} \right)^{-0,754} - i 0,087 \left( \frac{\rho_0 f}{\sigma} \right)^{-0,732} \right], \quad (3.35)$$

$$k_c = \frac{2\pi f}{c_0} \left[ 1 + 0,0978 \left( \frac{\rho_0 f}{\sigma} \right)^{-0,7} - i 0,189 \left( \frac{\rho_0 f}{\sigma} \right)^{-0,595} \right], \quad (3.36)$$

де  $f$  – частота звукової хвилі.

Для отримання співвідношень, які мають прикладне значення для проектування захисних поверхонь необхідної ефективності слід отримати розрахункові функції у дійсному вигляді. В результаті стандартних математичних перетворень, отримуємо:

$$\alpha = \frac{4\rho_0 c_0 (\cosh(\varepsilon) - \cos(\theta)) (\beta \sinh(\varepsilon) - \gamma \sin(\theta))}{(\beta \sin(\theta) + \gamma \sinh(\varepsilon))^2 + (\beta \sinh(\varepsilon) - \gamma \sin(\theta) + \rho_0 c_0 (\cosh(\varepsilon) - \cos(\theta)))^2}, \quad (3.37)$$

де

$$\beta = \rho_0 c_0 \left( 1 + 0,0571 \left( \frac{\rho_0 f}{\sigma} \right)^{-0,754} \right), \quad (3.38)$$

$$\gamma = 0,087 \rho_0 c_0 \left( \frac{\rho_0 f}{\sigma} \right)^{-0,732}, \quad (3.39)$$

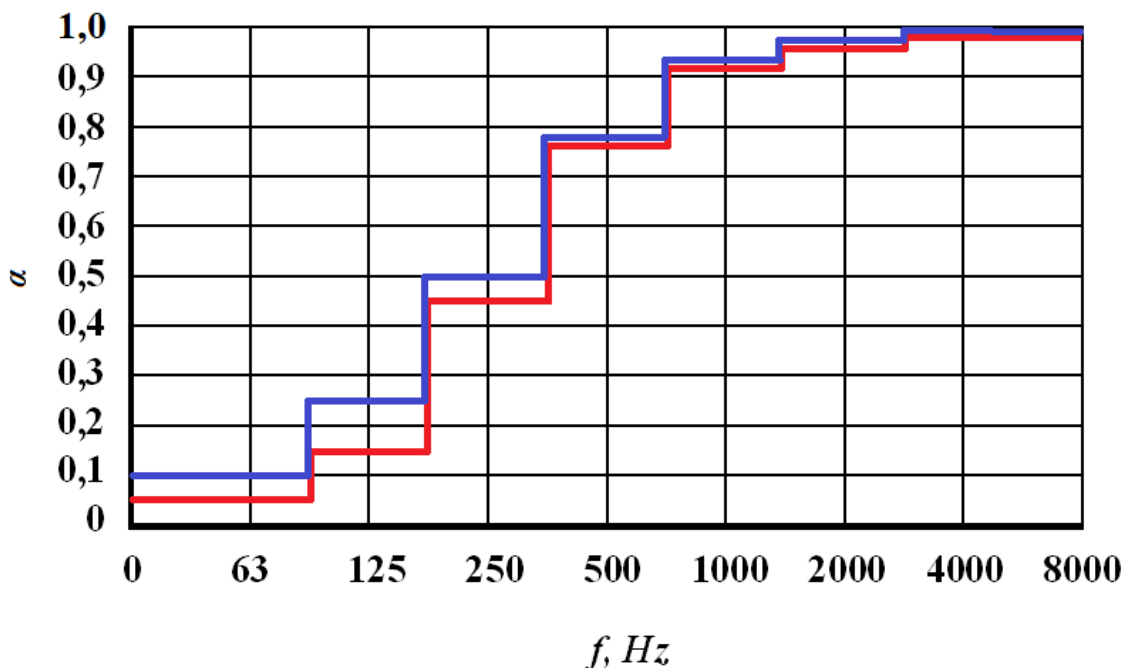
$$\varepsilon = 0,756 \frac{\pi f d}{c_0} \left( \frac{\rho_0 f}{\sigma} \right)^{-0,595}, \quad (3.40)$$

$$\theta = \frac{4\pi f d}{c_0} \left( 1 + 0,0978 \left( \frac{\rho_0 f}{\sigma} \right)^{-0,700} \right). \quad (3.41)$$

Дані співвідношення подані у дійсній формі надають змогу однозначно

визначити необхідні параметри захисного шару для отримання потрібного коефіцієнту поглинання енергії звукової хвилі. Не дивлячись на велику кількість вхідних даних, у реальних умовах їх кількість обмежується опором повітряному потоку. У реальних умовах товщина пористого шару обмежується можливостями нанесення на поверхні стін, особливо зі складним рельєфом, що притаманне історичним і культурним будівлям.

На основі розробленого математичного апарату було спроектовано шумопоглинальний матеріал на основі базальтових волокон й визначено його коефіцієнти шумопоглинання. Дослідження здійснювалося в імпедансній трубці. Товщини базальтових волокон складали 3–5 мкм. Густина матеріалу становила 300-310 кг/м<sup>3</sup>. Опір продуванню – 6-8·10<sup>4</sup> (Па·с)/м<sup>2</sup>. Досліджувалися зразки товщинами 20 мм і 50 мм. Результати випробувань наведено на рисунку 3.10.



**Рис. 3.10.** Залежність коефіцієнтів шумопоглинання  $\alpha$  від частоти звукової хвилі базальтового матеріалу:

— товщина зразка 20 мм; — товщина зразка 50 мм

Результати, наведені на рисунку 3.10, свідчать, що коефіцієнти

шумопоглинання мають прийнятну збіжність з розрахунковими на частотах вищих за 250 Гц. Для частот 125–250 Гц розбіжність досягає 20–25 %, що треба враховувати у процесі проектування захисних матеріалів і конструкцій. В цілому, запропонований розрахунковий апарат може бути використаний в інженерній практиці. Проектування матеріалу – визначення коефіцієнтів шумопоглинання в широкому частотному діапазоні потребує великих обсягів розрахунків з визначенням гіперболічних функцій. Тому для прискорення процесу проектування та можливості оптимізувати захисні властивості матеріалу методом перебору доцільно цей процес автоматизувати. Це можливо, наприклад, із застосуванням підходу запропонованому в [106]. Цей підхід надав можливість отримати адекватні результати щодо поширення електромагнітних полів та низькочастотного шуму. Можливо також раціоналізувати процес обирання необхідних параметрів за їх великою кількістю. Це надасть змогу підвищити точність розрахунків, наданих у цій роботі. Застосуванням більшої кількості факторів, порівняно з обраною моделлю, наприклад, із використанням моделі Johnson-Champoux-Allard Model (JCA). Ця модель, окрім опору повітряному потоку, враховує tortuosity повітряних каналів у пористому матеріалі, загальну пористість матеріалів та термічні та в'язкісні характеристичні довжини.

У деяких випадках необхідно здійснювати звукоізоляцію від зовнішніх і внутрішніх джерел шуму з різними амплітудно-частотними характеристиками. Тому розроблений механізм проектування дозволяє застосувати два тонких шумозахисних матеріалів з різними властивостями.

Застосування базальтового волокна у якості сировини для виготовлення шумопоглинальних матеріалів відкриває можливості розширити їх функціонал. Попередні дослідження свідчать, що композиційні фарби для екранування електромагнітних випромінювань мають добре зчеплення з поверхнею базальту. Тому додавання такої фарби у вихідну сировину забезпечує, крім шумопоглинальних властивостей, екранування електромагнітних випромінювань кінцевим матеріалом.

Аналіз даних рис. 3.10 дозволяє зробити кілька практичних висновків. Наведений матеріал має високу ефективність для поглинання шуму середніх та високих частот. Для більшості прикладних задач такі коефіцієнти звукопоглинання є надлишковими. У області низьких частот коефіцієнти звукопоглинання відносно невеликі, що є очікуваним. Тому у практичній діяльності доцільно підвищити коефіцієнти звукопоглинання у низькочастотній області звукового спектра. При цьому знизиться звукопоглинання високочастотної області, що не є критичним. Відомо, що методи зниження рівнів шуму низької звукової частоти й інфразвуку принципово не відрізняються. Тому надання конструкції певних резонансних властивостей разом з прийнятним опором продуванню зробить шумозахисну конструкцію більш широкосмуговою. При цьому слід враховувати реальні амплітудно-частотні характеристики екранованого акустичного поля. Застосування розробленого математичного апарату значно спрощує постановку і вирішення конкретної прикладної задачі. Ще одним критичним фактором є товщина покриття. Слід враховувати, що залежність захисних властивостей конструкцій від товщини не є лінійною, принаймні на одній частоті або смузі частот. Тому на попередньому етапі розробки необхідно провести певну аналітичну оптимізацію габаритних параметрів матеріалу або конструкцій. За наявності відповідного програмного забезпечення це можливо за рахунок перебирання різних варіантів й обирання найбільш прийнятних для даних конкретних умов.

Перевагою наведеного підходу є можливість проєктування як стаціонарних, так і переносних конструкцій для захисту як від шуму звукового діапазону, так і інфразвуку.

### **Висновки до розділу 3**

1. Встановлено, що рівні шуму будівельної техніки в умовах щільної забудови в багатьох випадках перевищують гранично допустимі рівні. Це ж

стосується рівнів інфразвуку. Показано, що значна частина шумового навантаження на середовище припадає на низькочастотну область звукового спектра та на інфразвук. Це вимагає розроблення спеціальних заходів захисту працюючих і населення.

2. Досліджено ефективність тонких шумозахисних екранів у залежності від їх габаритів та відстаней до приймача звуку. Встановлено, що у багатьох випадках, особливо у низькочастотній області спектра, спостерігається не зниження рівня шуму у деяких октавних смугах, а підвищення. Це обумовлено дифракційними явищами на кромках екранів та інтерференцією прямих та відбитих звукових променів. В умовах обмежених просторів цей ефект може бути критичним щодо впливу на працюючих і населення. Надано загальні підходи до проектування захисних конструкцій у низькочастотній області звукового спектра.

3. Показано, що при реконструкції і відновленні будівель необхідне використання матеріалів, які забезпечують сучасні нормативні вимоги щодо кількісних значень шуму широкого частотного діапазону усередині будівлі. Головними вимогами до таких матеріалів є технологічність застосування, можливість покривання великих площ складної конфігурації без спотворення зовнішнього вигляду внутрішніх інтер'єрів і зовнішнього вигляду будівель.

4. Було розроблено математичний апарат для проектування захисних конструкцій резонансного типу, які ефективно екранують інфразвук та низькочастотний звук. Теоретично показано та експериментально підтверджено, що нанесення на резонансні панелі перфорацій певних розмірів робить захисну панель широкосмуговою. Зокрема на частотах від 20 до 200 Гц досягаються індекси зниження шуму 4-8 дБ, що можна вважати задовільним для даного частотного діапазону. На частотах 500–1000 Гц індекси зниження шуму складають 7–37 дБ за налаштування панелі на резонансну частоту 2500 Гц. За налаштування панелі на резонансну частоту 1800 Гц досягаються індекси зниження шуму 25–35 дБ. Резонансною частотою обирається частота максимальної амплітуди, яка визначається на основі акустичного моніторингу середовища.

5. Розроблено зручний у використанні математичний апарат для проектування пористих матеріалів малої товщини для поглинання шуму середніх і високих частот. Встановлено, що високі коефіцієнти поглинання 0,8 і вище досягаються на частотах вищих за 300 Гц. При цьому підвищення коефіцієнта поглинання при збільшенні товщини матеріалу з 20 мм до 50 мм для частот вищих за 300 Гц є несуттєвим. Це дозволяє максимально мінімізувати товщини шумозахисних матеріалів для поглинання шуму середніх і високих частот.

6. Обґрунтовано можливість розширення функціональних можливостей пористого шумопоглинального матеріалу. Покриття базальтових волокон фарбою для екранування електромагнітного випромінювання дозволить забезпечити одночасний захист від шуму і електромагнітних полів техногенного походження. Наведений підхід може бути застосований для розроблення і впровадження як стаціонарних, так і переносних конструкцій для зниження рівнів шуму окремих одиниць будівельної техніки та об'єктів будівництва в цілому за його межами.

Основні положення розділу 3 опубліковані автором у наукових працях [1], [2], [3], [5].

## **РОЗДІЛ 4. ПЛАНУВАННЯ ТА ВПРОВАДЖЕННЯ ОРГАНІЗАЦІЙНО-ТЕХНІЧНИХ ЗАХОДІВ ЗІ ЗНИЖЕННЯ ВПЛИВУ БУДІВЕЛЬНОГО ШУМУ ТА ІНФРАЗВУКУ НА ПРАЦЮЮЧИХ ТА НАСЕЛЕННЯ**

### **4.1. Зниження рівнів шуму та інфразвуку як складова організаційно-технічних заходів з нормалізації рівнів фізичних чинників техногенного походження**

Акустичний шум є одним з фізичних чинників техногенного походження, які негативні впливають на людей у виробничих та побутових умовах. Це електромагнітні поля та випромінювання, деіонізація повітря, ненормативний температурний режим тощо. При одночасному впливі кількох несприятливих чинників доцільно розглядати можливість їх одночасної нормалізації. При застосуванні захисних конструкцій на відкритій місцевості, захист від шуму може бути єдиним фізичним чинником для якого конструкція призначена. Це стосується як стаціонарних, так і переносних конструкцій. Але у разі застосування звукопоглинальних матеріалів і конструкцій у якості облицювань доцільно розглядати можливість одночасного зниження кількох критичних фізичних чинників як це запропоновано у дослідженні [103]. Такий підхід зменшує масогабаритні параметри захисного шару й знижує вартість заходів захисту.

Для вироблення резонансних шумозахисних панелей у багатьох випадках матеріал, з якого виробляється панель, не є критичним за умови прийнятних значень його пружних модулів. У той же час багато металевих або металовмісних матеріалів значною мірою екранують електромагнітні поля. Особливо це стосується композиційних матеріалів. Наприклад, застосування базальтових волокон у конструкціях шумозахисних матеріалів сприяє підвищенню енергоефективності будівлі через значне поглинання базальтом електромагнітних випромінювань інфрачервоного діапазону. При цьому додавання у вихідну суміш металевих або металовмісних частинок забезпечує екранування електромагнітних випромінювань дуже високих, ультрависоких і надвисоких частот. Наявність у

конструкції феромагнітних елементів (як суцільних, так і дрібнодисперсних) сприяє зниженню рівнів електромагнітних полів промислової частоти. При цьому обов'язковим є врахування механічних властивостей облицювального матеріалу, ступінь його деградації у процесі експлуатації тощо. Важливим елементом комбінованого захисту є спосіб кріплення захисної конструкції на носій. Відомо, що певний зазор між шумозахисною конструкцією (у тому числі й перфорованою) та стіною підвищує ефективність шумозахисту. Але величина такого зазору не є особливо критичною для ефективності панелей. Якщо такий складатиме чверть довжини найбільш критичної частоти електромагнітного випромінювання, то така конструкція може практично повністю поглинати електромагнітне випромінювання й не давати його відбиття, що в умовах різкого підвищення частот мобільного зв'язку є дуже актуальним. Недоліком багатьох захисних матеріалів і конструкцій на полімерній основі є електризація їх поверхонь. Тому при обиранні матеріалу для виготовлення матриці композиту слід враховувати можливе накопичення статичних зарядів, що призводить до деіонізації повітря і можливого впливу статички на працездатність електронного обладнання. Дослідження свідчать, що принаймні за умови застосування композиційного матеріалу усередині приміщень мінімальному накопиченню статичних зарядів відповідають латекси. Крім того, серед сучасних полімерних матеріалів латекси є найбільш екологічними. Слід враховувати, що розроблення стандартного універсального матеріалу або конструкції для захисту від комплексу фізичних чинників антропогенного походження не є доцільним. Проєктування потрібного матеріалу або конструкції здійснюється за результатами моніторингу фізичних чинників й визначення їх критичності щодо впливу на людей.

#### **4.2. Порядок розроблення та впровадження матеріалів і конструкцій для нормалізації рівнів шуму та інфразвуку в умовах щільної забудови**

У реальних умовах застосування організаційно-технічних заходів зі зниження рівнів шуму та інфразвуку параметри засобів захисту для ефективного

зниження впливу на людей відрізняються. Наприклад, у багатьох випадках має місце більший внесок низькочастотного шуму у загальне акустичне навантаження на середовище. При цьому засоби захисту від низькочастотного шуму та інфразвуку майже не відрізняються. В інших випадках найбільш ваговою складовою шуму є коливання середніх та високих частот, а засоби захисту від їх впливу простіше реалізуються через зменшення довжини хвиль.

Але організаційно-технічні заходи зі зниження акустичних впливів на людей доцільно певним чином алгоритмізувати. Визначення порядку розроблення захисних матеріалів і конструкцій та розрахункового прогнозування ефективності захисту заощаджує витрати коштів й часу на розробку.

Для зниження рівнів шуму будівельних майданчиків та окремих одиниць техніки в умовах діючої забудови основними засобами захисту є шумозахисні конструкції. Обирання форми й параметрів шумозахисної конструкції повинно відповідати кільком вимогам:

- використання шумозахисних або звукоізоляційних конструкцій не повинне впливати на виробничі процеси, заважати працюючим і населення (у тому числі через відбиття звукових хвиль);
- параметри шумозахисної конструкції повинні забезпечувати достатній, з точки зору охорони праці та акустичної екології, рівень звукоізоляції;
- технологія виготовлення конструкцій повинна бути достатньо простою, а витрати не повинні суттєво впливати на вартість виконання будівельних робіт.

Слід враховувати, що існує ймовірність неналежного захисту населення, що мешкає в оточуючій забудові й посилення впливу на працюючих. Також можливий частковий захист людей внаслідок неможливості збільшення габаритних розмірів захисних конструкцій. При цьому слід враховувати що тонкий акустичний екран є найбільш дешевим виробом, тому при оцінюванні необхідної ефективності конструкції слід керуватися принципом розумної достатності. Розроблення захисної конструкції або захисного матеріалу можна розділити на кілька етапів:

- вивчення існуючих прототипів. Аналіз засобів і способів зниження шуму за даними наукових досліджень й прикладних розробок. Визначення переліку необхідних заходів й технічного завдання на зниження шуму у відповідності до чинних санітарних норм і правил.
- моніторинг акустичних характеристик будівельних майданчиків та обладнання, яке використовується. Не дивлячись на часткові розбіжності у переліку обладнання, в основному воно є типовим. В даному випадку критичними є відстані до об'єктів забудови. Необхідним є максимально точне визначення амплітудних значень низькочастотного звуку та інфразвуку, що надає змогу виявити частоти, які при конструюванні обираються за резонансні. Обирання основних конструктивних параметрів засобів шумозахисту. Створення ескізного проєкту шумозахисної конструкції або принципового складу шумозахисного матеріалу.
- виготовлення й випробування шумозахисних конструкцій й матеріалів. Їх виконують у ревербераційній камері та з використанням імпедансних труб, що має на меті уточнення технічних і технологічних рішень. Виконуються уточнення розрахунків щодо очікуваних результатів. Розроблення технічного проєкту шумозахисної конструкції або матеріалу.
- проєктування шумозахисної конструкції або матеріалу з урахуванням технологічних норм, які забезпечують мінімальні витрати коштів, матеріалів і часу на їх виготовлення за дотримання необхідної ефективності. Розроблення робочих креслень, дослідних зразків та технології виготовлення захисного матеріалу.
- виготовлення дослідних зразків захисних конструкцій, встановлення її у потрібному місці й проведення акустичних випробувань. Доопрацювання конструкції з метою отримання максимальної ефективності. Порівняння фактичних значень ефективності конструкцій з вихідними характеристиками джерел шуму.

На практиці процеси розроблення захисних конструкцій і матеріалів можуть дещо відрізнятись у залежності від конкретних умов експлуатації.

Розроблення шумозахисної конструкції або матеріалу дослідним шляхом дуже витратне. Тому доцільне розрахункове прогнозування їх ефективності. Акустичні розрахунки повинні виконуватися при проєктуванні з метою оцінки ефективності захисних конструкцій для вибору раціонального рішення. Вони експериментально уточнюються на дослідних зразках, а за необхідності на моделях. Обирання раціонального рішення шляхом розрахунків виконують методом послідовних наближень – акустична ефективність початкової конструкції визначається розрахунком, потім за результатами розрахунків параметри конструкції уточнюються і знову оцінюються розрахунками. Наведене обумовлено тим, що для панелей резонансного типу та звукопоглинальних матеріалів їх ефективність залежить від низки конструктивних рішень (багатофакторність) та умов експлуатації. За наявності прикладного програмного забезпечення щодо розрахункового прогнозування ефективності шумозахисної конструкції або матеріалу раціоналізація конструктивних та технологічних рішень може здійснюватися шляхом перебору різних комбінацій та варіантів. У результаті обирається найбільш прийнятний або компромісний варіант.

Порядок розрахунку звукоізоляції одностінної конструкції наведено у розділі 3.1 із застосуванням співвідношення 3.5 і застосуванням кроку 0,25 відносно критичної частоти панелі.

При проєктуванні тонких акустичних екранів за умови їх достатності з точки зору амплітудно-частотних характеристик шуму практичні розрахунки повинні враховувати висоту й ширину екрана та інші геометричні параметри, у тому числі координати розміщення на шляху поширення звукових хвиль. При цьому необхідно спитатися на необхідні значення ефективності зниження шуму у контрольних точках.

Загалом при прогнозуванні ефективності тонких акустичних екранів доцільно дотримуватися порядку, наведеному у [107].

Застосування тонкого екрана не виключає його комбінації з елементами резонансної панелі, у тому числі й перфорованої. Найбільш доцільним є наступний порядок виконання розрахунків:

- Накреслюється схема розміщення джерела шуму, екрана, контрольної точки. У вибраній системі координат визначаються мінімальні відстані від джерела до екрана і від екрана до точки контролю.
- Задаються умови поширення звуку до і після екран (з урахуванням типу підстилаючої поверхні).
- Вважаючи, що екран довгий і тонкий, задаються значення його висоти, (розрахунок проводиться через 1 м). Для кожної із висот екрана визначається за допомогою розрахункового алгоритму ефективність зниження шуму. Вибирається така висота екрана, починаючи з якої виконуються вимоги щодо зниження шуму на основі оцінки вибраного критерію.
- Ширина екрана визначається після вибору його висоти з умов забезпечення зниження шуму краями екрана (також ітераційно).
- Для вибраних геометричних параметрів екрана оцінюються остаточні значення його спектральної і сумарної ефективностей.
- Якщо вибрана конструкція екрана, наприклад за економічними вимогами, несприятлива, необхідно використати комплексний підхід до проблеми зниження шуму. Одним зі шляхів реалізації комплексного підходу може бути використання природних поглиначів шуму.

Експериментальні дослідження свідчать, що з прийнятною похибкою ефективності акустичних екранів у залежності від відстані до контрольної точки та його висоти відповідають даним, наведеним у таблиці 4.1. Слід враховувати, що значення зниження шуму надані за еквівалентним показником. Ці дані не враховують можливі підвищення рівня шуму на деяких частотах внаслідок інтерференційних явищ. У реальних умовах ці явища критично залежать від характеристики імпедансної поверхні.

## Ефективність шумозахисних екранів за еквівалентними даними

Відстань між екраном і розрахунковою точкою, м	10	20	50	100
Висота екрана, м	2; 4; 6	2; 4; 6	2; 4; 6	2; 4; 6
Зниження рівня звуку екраном, дБА	7; 12; 16	7; 12; 15	7; 11; 14	7; 11; 13

Для суцільних панелей, виготовлених з матеріалів з відомими характеристиками граничну частоту хвильового збігу (збіг швидкості звуку у повітрі та згинної хвилі у матеріалі) визначають зі співвідношення:

$$f_r = \frac{c_0^2}{2\pi} \sqrt{mD}, \quad (4.1)$$

де  $c_0$  – швидкість звуку у повітрі,

$m$  – поверхнева густина матеріалу,

$D$  – циліндрична жорсткість панелі.

Згідно (3.26) можна визначити зі співвідношення:

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}, \quad (4.2)$$

де  $E$  – модуль Юнга,

$\mu$  – коефіцієнт Пуассона,

$h$  – товщина панелі.

Для усіх поширених матеріалів швидкості поздовжніх хвиль відомі [108] (табл. 4.2)

Таблиця 4.2

Параметри матеріалів для виготовлення шумозахисних панелей

Матеріал	Густина, кг/м <sup>3</sup>	Швидкість поздовжньої хвилі, м/с
Сталь	7,8	5500
Алюміній	2,7	5200
Гіпсокартон	1,2–1,3	2500
ОСБ	600–700	1700

Тому граничну частоту можна з прийнятною похибкою визначити зі співвідношення:

$$f_r = \frac{c_0^2}{1,8c_n h}, \quad (4.3)$$

де  $c_n$  – швидкість поздовжньої хвилі у матеріалі,

$h$  – товщина панелі.

Залежність звукоізоляції від частоти звуку надано у таблиці 4.3

Таблиця 4.3

Частотна залежність звукоізоляції

$f/f_r$	0,25	0,5	1,0	1,5	2,0
$R$ , дБ	8	12	8	14	16

Наведені співвідношення наближені, але немонотонність залежності обумовлює різні підходи до обчислення звукоізоляції [108]. Для малих значень

$$\text{співвідношень } f/f_r \quad (f < 0,5-0,3f_r) \quad R = 20 \lg kmf - 47,5, \text{ де } R = 1 \frac{m^2}{\text{кг} \cdot \text{Гц}}$$

обумовлює розмірність, враховуючи напівемпіричність співвідношення:

Для  $f > 1,5f_r$ :

$$R = 20 \lg \left( \frac{\pi f_2 m}{\rho_0 c_0} \right) + 25 \lg \left( \frac{f}{f_r} \right) + 10 \lg \eta + 3, \quad (4.4)$$

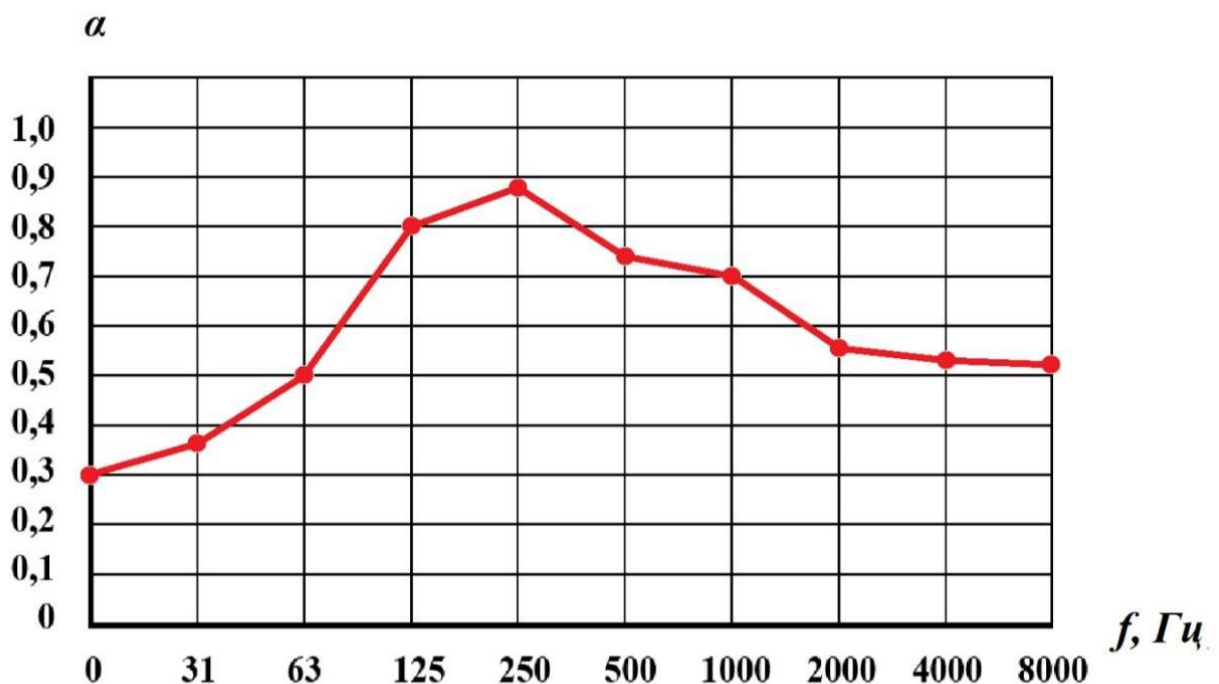
де  $\eta$  – коефіцієнт втрат енергії у конструкції.

Для сталі й алюмінію він складає приблизно  $10^{-3}$ , гіпсокартону –  $10^{-2}$ , ОСБ –  $7-8 \cdot 10^{-2}$ . Слід враховувати, що наведений підхід суто оціночний. Його застосування зменшує обсяги проєктних робіт й мінімізує кількість лабораторних вимірювань.

У разі, якщо захисний матеріал пористий, то для визначення ефективності шумозахисту згідно (3.41) обов'язковим є вимірювання пористості й опору продуванню.

У процесі проєктування шумозахисту, який складається з двох шарів доцільно використовувати матеріали з різними граничними частотами. При цьому резонансні панелі, особливо перфоровані (3.20), доцільно налаштувати на дві частоти. Ці частоти обираються за результатами натурних вимірювань спектрального складу шуму – частоти максимальних амплітуд. Для точного визначення цих частот необхідно отримати неперервний спектр звуку. Усі розрахунки здійснюються методом «від зворотного». Виходячи з вимірювань реальних рівнів шуму та його спектрального складу задаються потрібні параметри зниження шуму. На основі цих даних визначаються параметри захисної

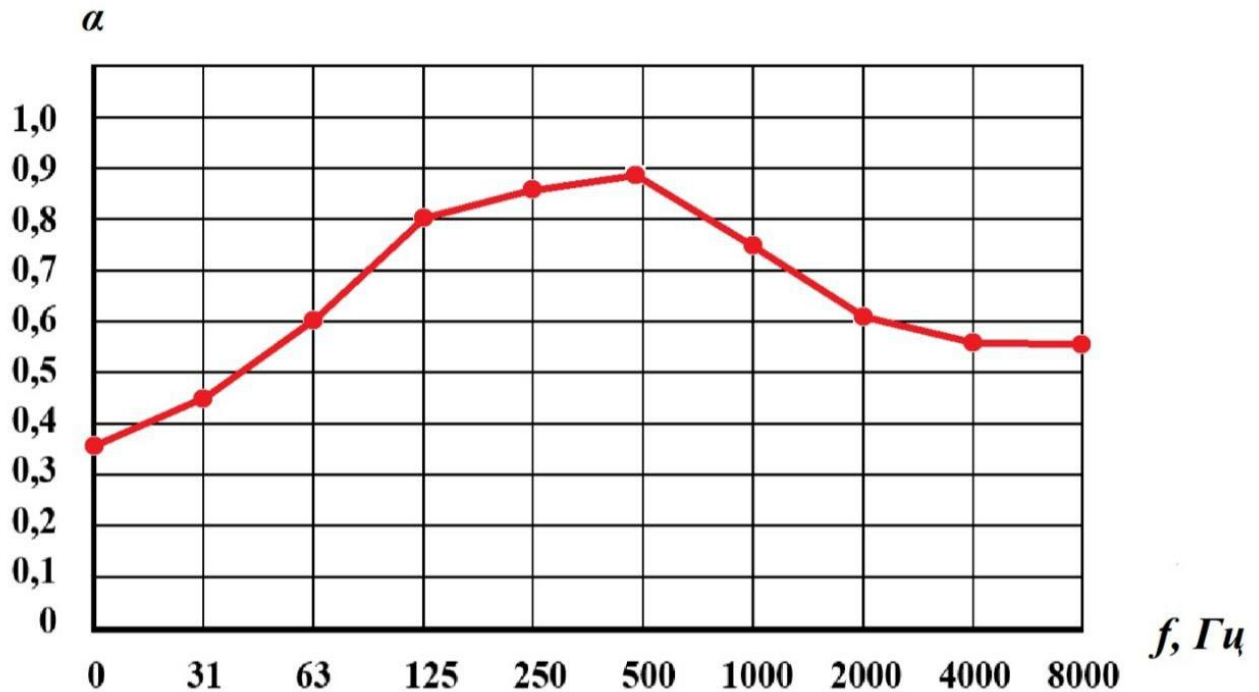
конструкції або матеріалу. У багатьох випадках крім рівнів шуму (потрібної ефективності захисту) існують інші обмеження – максимально можливі розміри захисної конструкції, її відстань від поверхні монтажу, стандартна пористість звукопоглинального матеріалу тощо. Тому у процесі проектування захисної конструкції або матеріалу перебираються різні комбінації параметрів, які забезпечують найбільш раціональний результат. На основі запропонованого підходу було випробувано реальні захисні конструкції. Метою було визначення співвідношення коефіцієнтів звукопоглинання на малих, середніх та високих частотах. На рис. 4.1 наведено результати випробувань залежності коефіцієнта поглинання звуку широкосмуговим суцільним екраном.



**Рис. 4.1** Залежність коефіцієнтів звукопоглинання широкосмугового акустичного екрана у октавних смугах частот

Головною метою створення такого екрана є максимальне поглинання звуку на низьких частотах, притаманних об'єктам будівництва. Як видно з рис. 4.1,

ефективність екрана та таких частотах задовільна. Було порівняно отримані результати з екрануючою конструкцією за наявності перфорацій (рис. 4.2).



**Рис. 4.2** Залежність коефіцієнтів звукопоглинання широкосмугового акустичного екрана у октавних смугах частот за наявності перфорацій

Як видно з отриманих даних, коефіцієнти звукопоглинання дещо підвищилися.

За наявності високої складової високочастотного шуму необхідно між шарами панелей вмістити пористий звукопоглинальний матеріал, ефективність якого було розглянуто вище. У загальному випадку коефіцієнти звукопоглинання залежать як від питомого опору продуванню повітря, так і його товщини. Проектування конкретних захисних конструкцій здійснюється на основі акустичного моніторингу з урахуванням амплітудно-частотних характеристик шуму однотипних об'єктів будівництва.

В цілому розроблення та впровадження шумозахисних матеріалів і конструкцій доцільно здійснювати за певним алгоритмом (рис. 4.3).



**Рис. 4.3.** Алгоритм процесу розроблення й тестування шумозахисної конструкції.

Застосування наведеного алгоритму мінімізує ризики неврахування деяких факторів впливу, зокрема фонових рівнів шуму. При здійсненні проєктування слід враховувати, що найбільші фонові значення дають низькочастотний шум та інфразвук, який розповсюджується на великі відстані від сторонніх джерел.

Позиція алгоритму тестування шуму «тестування конструкції за іншими вимогами» дещо невизначена. Її зміст залежить від спрямованості конструкції. Це можуть бути показники за міцністю (пружні модулі), спроможність матеріалу або конструкції до термоізоляції та поглинання електромагнітної енергії тощо. Вимог за цією позицією формуються у кожному конкретному випадку.

### 4.3. Результати випробувань ефективності матеріалів і захисних конструкцій у реальних умовах експлуатації

Було проведено тестування захисних конструкцій (додаток Б).

Випробування виконувалися з використанням каліброваного обладнання у заглушеній (ревербераційній) камері. Умови випробувань виключали сторонній вплив на результати вимірювань. Вимірювання здійснювалися в октавних смугах частот.

Тестувалася перфорована панель завтовшки 10 мм з нерегулярним розташуванням отворів діаметром 10 мм із середньою щільністю розташування отворів на відстанях 25 мм між їх центрами. Розміри панелі  $2,25 \times 1,75$  м. Індеси зниження звуку наведено у таблиці 4.4.

Таблиця 4.4

Індеси зниження рівнів звуку перфорованою панеллю

$f$ , Гц	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000
$\Delta L$ , дБ	5	7	12	34	25	28	43	38

Результати випробувань резонансної панелі, налаштованої на частоту 2500 Гц наведено у таблиці 4.5.

Таблиця 4.5

## Індекси зниження рівнів звуку резонансною панеллю

$f$ , Гц	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000
$\Delta L$ , дБ	4	5	6	8	10	18	44	35

Результати випробувань пористого матеріалу завтовшки 30 мм наведено у таблиці 4.6.

Таблиця 4.6

## Коефіцієнти поглинання пористого матеріалу

$f$ , Гц	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000
$\alpha$	0,30	0,25	0,25	0,5	0,78	0,92	0,94	0,95

Середні індекси зниження інфразвуку у діапазоні 2 –16 Гц склали 8–10 дБ з лінійною шкалою.

Результати дослідження впроваджено у навчальний процес Київського національного університету будівництва і архітектури при підготовці здобувачів вищої освіти зі спеціальностей Екологія, Технології захисту навколишнього середовища та докторів філософії зі спеціальності Цивільна безпека (додаток В).

### Висновки до розділу 4

1. Розроблення та впровадження організаційно-технічних заходів зі зниження рівнів техногенного шуму та інфразвуку доцільно здійснювати у комплексі зі зниженням рівнів інших фізичних чинників середовища техногенного походження. Зокрема при розробленні звукопоглинальних матеріалів для облицювання будівель і споруд доцільно передбачити підвищення

енергоефективності будівель такими матеріалами та часткового екранування електромагнітних полів.

2. Розроблення шумопоглинальних матеріалів і конструкцій доцільно здійснювати за певним алгоритмом. Сформульовані етапи проєктування дозволяють розробити матеріали потрібної ефективності на принципах розумної достатності. При цьому обов'язковим є врахуванням амплітудно-частотних характеристик шуму конкретних джерел або об'єктів, а також типового шуму об'єктів будівництва. У проєктні рішення необхідно закладати відстані від об'єктів будівництва до житлової забудови й враховувати ці відстані у процесі проєктування.

3. Надано загальні підходи до акустичного розрахунку, зокрема для проєктування акустичних екранів і конструкцій різних амплітудно-частотних характеристик. Застосування запропонованих розрахунків доцільне на попередніх етапах проєктування, що знижує витрати часу і коштів на проєктування матеріалів і конструкцій конкретного застосування.

4. Проведене незалежне тестування розроблених конструкцій для зниження рівнів техногенного шуму довело прийнятну збіжність розрахункових даних з експериментальними. Зокрема, отримані індекси зниження шуму звукового діапазону та інфразвуку прийнятно корелюють як з розрахунковими, так і отриманими у лабораторних умовах. Деякі розбіжності обумовлені відмінностями у проведенні вимірювань, а також похибками приладів. Результати дослідження впроваджено у навчальний процес Київського національного університету будівництва і архітектури при підготовці здобувачів вищої освіти зі спеціальностей Екологія, Технології захисту навколишнього середовища та докторів філософії зі спеціальності Цивільна безпека.

Основні положення розділу 4 опубліковані автором у наукових працях [1].

## ВИСНОВКИ

1. Аналіз наукових публікацій та прикладних розробок у галузі зниження впливу техногенного шуму на працюючих та населення свідчить, що більшість робіт стосуються транспортного шуму, шуму гірничих та енергетичних об'єктів. Дослідження шуму об'єктів будівництва мають фрагментарний або загальний характер і не надають практичних рекомендацій щодо його зниження. Відсутні дослідження щодо просторових розподілів будівельного шуму в умовах наближеності до житлової забудови з великою кількістю відбивальних поверхонь з різними імпедансними показниками. Рівні низькочастотного шуму та інфразвуку визначаються, здебільшого, на підприємствах гірничо-переробної галузі та вітрогенерації, де можна визначати прийнятні санітарно-захисні зони, що неможливо для об'єктів будівництва, розташованих у населених місцях.

2. Вимірювання рівнів шуму будівельної техніки свідчить, що рівні шуму складають 80–110 дБА. При цьому значний внесок у загальний шум дають відбиття та перевідбиття звукових хвиль. Коефіцієнти звукопоглинання твердих поверхонь складають 0,02–0,06 у залежності від частоти. В умовах щільної забудови еквівалентні рівні шуму будівельних майданчиків складають 80–90 дБА. Резервні джерела електроживлення мають середню шумність 76 дБА (дизельні), 92 дБА (бензинові). Переважний внесок у загальні рівні шуму будівельної техніки дає низькочастотний шум – 92–100 дБ, що треба враховувати у процесі розроблення засобів і заходів захисту.

3. Досліджено ефективність тонких акустичних екранів кінцевих розмірів у залежності від відстані до приймача та висоти екрана. Встановлено, що за загальних індексів зниження шуму 7–13 дБА зі збільшенням відстані з 10 до 100 м та висоти з 2 до 6 м відбувається підвищення рівнів звукового тиску до -5–-15 дБ у захищених зонах у деяких частотних смугах. Частота та значення підвищення шуму у загальному випадку непередбачувані і залежать від амплітудно-частотних

характеристик конкретних джерел шуму, габаритних розмірів захисної конструкції та показників імпедансних поверхонь.

4. В умовах великих амплітуд низькочастотного шуму та інфразвуку найбільш ефективним засобом захисту працюючих і населення є резонансні панелі. Розроблено розрахунковий апарат для проєктування панелей, який оперує пружними модулями матеріалів та їх габаритними параметрами. Встановлено, що найбільш ефективними є перфоровані панелі з нерегулярним розташуванням отворів. Показано, що отвори знижують добротність коливальної системи й роблять панель більш широкосмуговою. У низькочастотній області звукового спектра індекси зниження шуму складають 5–8 дБ, а на середніх та високих частотах – 25–45 дБ. При застосуванні двошарової панелі, налаштованої на частоти максимальних амплітуд низькочастотного звуку та інфразвуку, відбувається одночасне зниження значень цих чинників впливу. Резонансні частоти доцільно обирати за результатами вимірювання неперервних спектрів.

5. Вдосконалення моделі визначення коефіцієнтів звукопоглинання пористих матеріалів Delany-Bazley дозволило спростити процедуру прогнозування ефективності матеріалу або конструкції. Усі розрахунки оперують масогабаритними параметрами. Єдиний показник, який необхідно отримувати у лабораторних умовах – опір повітряному потоку. Він визначається у імпедансній трубці за стандартною методикою. Усі розрахунки переведено у дійсну форму, що спрощує виконання розрахунків фахівцями-практиками й автоматизувати процес розроблення захисного матеріалу або конструкції. Верифікація результатів розрахунків свідчить, що коефіцієнти звукопоглинання у низькочастотній області звукового спектра складають 0,15–0,20, а для середніх і високих частот – 0,8–0,9 і має прийнятну збіжність з прогнозованими даними.

6. Розроблено загальні підходи до проєктування захисних конструкцій та матеріалів, сформовано послідовність виконання розробки, включаючи етап попереднього оцінювання параметрів проєктованого виробу, виходячи з потрібних індексів зниження шуму або коефіцієнтів звукопоглинання. Отримані усереднені

дані щодо можливих параметрів захисних конструкцій у залежності від частотного діапазону звуку.

7. Проведене незалежне тестування розроблених конструкцій для зниження рівнів техногенного шуму довело прийнятну збіжність розрахункових даних з експериментальними. Зокрема, отримані індекси зниження шуму звукового діапазону та інфразвуку прийнятно корелюють як з розрахунковими, так і отриманими у лабораторних умовах. Деякі розбіжності обумовлені відмінностями у проведенні вимірювань, а також похибками приладів. Результати дослідження впроваджено у навчальний процес Київського національного університету будівництва і архітектури при підготовці здобувачів вищої освіти зі спеціальностей Екологія, Технології захисту навколишнього середовища та докторів філософії зі спеціальності Цивільна безпека.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Koczorowski, M., Bernard, N., Mauny, F. et al. Environmental noise exposure is associated with atherothrombotic risk. *Sci Rep* 12, 3151 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-06825-0>
2. 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>.
3. Myshchenko I, Pawlaczyk-Luszczynska M, Dudarewicz A, Bortkiewicz A. Health Risks Due to Co-Exposure to Noise and Respirable Crystalline Silica Among Workers in the Open-Pit Mining Industry—Results of a Preliminary Study. *Toxics*. 2024; 12(11):781. <https://doi.org/10.3390/toxics12110781>
4. Myshchenko I, Nazarenko V, Kolhanov A, Malyshevskaya O, Pohorilyi M, Hrechukch L, Ionda M, Nykyforuk O. The content of acoustic signals and biological effects of noise in conditions of high level of work intensity. *Journal of Preventive Medicine and Hygiene*. 2021; 62(3):E763-E769. <https://doi.org/10.15167/2421-4248/jpmh2021.62.3.1588>
5. Ascone, L., Kling, C., Wiczorek, J. et al. A longitudinal, randomized experimental pilot study to investigate the effects of airborne infrasound on human mental health, cognition, and brain structure. *Sci Rep* 11, 3190 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-82203-6>
6. Chaitidis, G.D.; Marhavilas, P.K.; Kanakaris, V. Potential Effects on Human Safety and Health from Infrasound and Audible Frequencies Generated by Vibrations of Diesel Engines Using Biofuel Blends at the Workplaces of Sustainable Engineering Systems. *Sustainability* 2022, 14, 7554. <https://doi.org/10.3390/su14137554>
7. Swen M., Stefan H., Martin H., Susanne K. Can infrasound from wind turbines affect myocardial contractility? A critical review. *Noise and Health*. 2022. 24(113), PP. 96-106. URL: <https://eref.uni-bayreuth.de/id/eprint/73087/>

8. Myshchenko I, Nazarenko V, Stopa M, Maslakiewicz M. Occupational exposure to infrasonic and low frequency noise: actual problems of hygienic standardization. *Ukr J Occup Health*. 2021; 17(4):235-44. <https://doi.org/10.33573/ujoh2021.04.235>

9. Directive 2003/10/EC – noise. Of 6 February 2003 on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (noise) (Seventeenth individual Directive within the meaning of Article 16(1) of Directive 89/391/EEC). European Agency for Safety and Health at Work. Latest update: 19/03/2021. URL: <https://osha.europa.eu/en/legislation/directives/82>

10. ДСН 3.3.6.037-99 Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. Постанова Міністерство охорони здоров'я від 01.12.1999 № 37. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/va037282-99#Text>

11. Health Effects of Exposure to Ultrasound and Infrasound. RCE-14, Documents of Health Protection Agency. DEFRA. 2010. URL: [https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/335014/RCE-14\\_for\\_web\\_with\\_security.pdf](https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/335014/RCE-14_for_web_with_security.pdf)

12. Polish Standard PN-86/N-O/338 – Infrasonic noise. Admissible acoustic pressure levels at workplaces and general requirements relative to measurements. Wyd Normaliz. Warsaw. 1986.

13. Wegleitung zu den Verordnungen 3 und 4 zum Arbeitsgesetz. Schweizerische Eidgenossenschaft Confederation (SECO) – Staatssekretariat für Wirtschaft. 2012. URL: [https://www.seco.admin.ch/seco/de/home/Publikationen\\_Dienstleistungen/Publikationen\\_und\\_Formulare/Arbeit/Arbeitsbedingungen/Wegleitungen\\_zum\\_Arbeitsgesetz/wegleitung-zu-den-verordnungen-3-und-4-zum-arbeitsgesetz.html](https://www.seco.admin.ch/seco/de/home/Publikationen_Dienstleistungen/Publikationen_und_Formulare/Arbeit/Arbeitsbedingungen/Wegleitungen_zum_Arbeitsgesetz/wegleitung-zu-den-verordnungen-3-und-4-zum-arbeitsgesetz.html)

14. Державні санітарні норми допустимих рівнів шуму в приміщеннях житлових та громадських будинків і на території житлової забудови. Наказ Міністерства охорони здоров'я України 22.02. 2019 року № 463.

15. Standard of Building Biology Testing Methods. SBM-2015/ Building biology evaluation guidelines for sleeping areas. Baubiologie Maes. Institut für Baubiologie + Nachhaltigkeit IBN. GUIDELINES. 4 p. URL: <https://buildingbiology.com/building-biology-standard/>

16. Про затвердження Державних санітарних правил планування та забудови населених пунктів [Чинний від 2019-03-07]: наказ М-ва охорони здоров'я України від 19.06.1996 № 173. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0379-96>

17. ДБН В.1.1-31:2013 Захист територій, будинків і споруд від шуму. Наказ від 27.12.2013 № 630 Про затвердження ДБН В.1.1-31:2013 Захист територій, будинків і споруд від шуму.

18. ДБН В.1.2-10:2021 Основні вимоги до будівель і споруд. Захист від шуму та вібрації. Наказ від 30.12.2021 № 366 Про затвердження державних будівельних норм.

19. Шевченко Ю. С. Розробка моделей оцінки та підвищення ефективності зниження шуму транспортних потоків: дис. к.т.н., 21.06.01, Київ, 2016, 236 с.

20. ISO 226:2023. Acoustics — Normal equal-loudness-level contours. <https://www.iso.org/ru/standard/83117.html>

21. DIN 45680. Measurement and evaluation of low-frequency environmental noise. Messung und Bewertung tieffrequenter Geräuschemissionen in der Nachbarschaft. [https://www.en-standard.eu/din-45680-measurement-and-evaluation-of-low-frequency-environmental-noise/?srsltid=AfmBOooW66eR0eZwCPcxGvM\\_TXEof1Bs7RyJZaDyAeHWOER\\_FdfRoDbw](https://www.en-standard.eu/din-45680-measurement-and-evaluation-of-low-frequency-environmental-noise/?srsltid=AfmBOooW66eR0eZwCPcxGvM_TXEof1Bs7RyJZaDyAeHWOER_FdfRoDbw)

22. ДСТУ ISO 9612:2008 «Акустика. Настанови щодо вимірювання та оцінювання експозиції шуму у виробничому середовищі (ISO 9612:1997, IDT). Наказ від 22.12.2008 № 493 Про затвердження національних стандартів України, зміни до національного стандарту, скасування нормативних документів та внесення змін до наказів Держспоживстандарту від 27.12.2006 р. N 375 та від

19.02.2008 р. № 62. Дата початку дії: 01.01.2010. Дата прийняття: 22.12.2008. URL: [http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id\\_doc=64358](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=64358)

23. Environmental noise guidelines for the European region. 2018:160. World Health Organization. URL: <https://www.euro.who.int/en/publications/abstracts/environmental-noise-guidelines-for-the-europeanregion-2018>

24. ISO 7196:1995 «Acoustics. Frequency-weighting characteristic for infrasound measurements». Publication date: 1995-03. Number of pages: 6. URL: <https://www.iso.org/standard/13813.html>

25. NSTU EN ISO 10534-1:2019 Acoustics. Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes. Part 1.

26. NSTU EN ISO 10534-2:2019 Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes. Part 2.

27. NSTU ISO 354:2007 Acoustics. Measurement of sound absorption in the reverberation chamber.

28. Mykhaylo Melnyk, Andriy Kernytskyu, Jaroslaw Rubacha, Tadeusz Kamisinski (2019). Method for Determining Airflow Resistance Of Porous Materials Based on Sound Absorption Coefficient. *Information Systems and Networks*, Volume 6, 2019, pp. 52 – 65, <https://doi.org/10.23939/sisn2019.02.052>

29. ISO 31000:2018. Risk management — Guidelines. <https://www.iso.org/ru/standard/65694.html>

30. IEC 31010:2019. Risk management — Risk assessment techniques. <https://www.iso.org/ru/standard/72140.html>

31. Основи акустичної екології: Навчальний посібник. В.С. Дідковський, В.Я. Акименко, О.І. Запорожець, В.Г. Савін, В.І. Токарєв. Кіровоград: ТОВ" Імекс ЛТД", 2002.–520 с.

32. Rui Jinfeng et al 2021 *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 791 012023. DOI 10.1088/1755-1315/791/1/012023

33. Rawaa Al-Isawi et al 2022 *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 961 012068. DOI 10.1088/1755-1315/961/1/012068

34. Левченко Л.О., Глива В.А., Бурдейна Н.Б. Автоматизація проєктування навчальних приміщень з безпечними умовами праці. *Управління розвитком складних систем*. 2022. № 50. С. 60-67. <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2022.50.60-67>.
35. Бурдейна Н.Б. Дослідження рівнів інфразвуку у навчальних приміщеннях та визначення умов їх нормалізації. *Системи управління, навігації та зв'язку*. Збірник наукових праць. – Полтава: ПНТУ, 2024. № 1. С. 165-169. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2024.1.165>.
36. 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>.
37. 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>
38. Liu X, Liu J, He J, Zhang J. Analysis of the characteristics of noise from substations in buildings. *Building Services Engineering Research and Technology*. 2022;43(1):41-56. doi:10.1177/01436244211035672
39. Ibarra-Zarate DI, Navas-Reascos G, Padilla-Ortiz A. Passive noise control in buildings: An engineering case study of ducted systems. *Building Services Engineering Research and Technology*. 2021;42(6):751-762. doi:10.1177/01436244211019635
40. McKenna M.H., McComas S.L., Danielle Whitlow R., Diaz-Alvarez H., Jordan A. M., Daniel Costley R., Simpson C. P. Remote structural infrasound: Case studies of real-time infrastructure system monitoring. *Journal of Infrastructure Systems*. 2021. 27(3), 04021021. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IS.1943-555X.0000623](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000623)
41. Keith S.E., Daigle G.A., Stinson M. R. Wind turbine low frequency and infrasound propagation and sound pressure level calculations at dwellings. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2018. 144(2). P. 981-996. <https://doi.org/10.1121/1.5051331>.

42. Кузнецова Е.Б., Булавина И.Д. Особенности мониторинга инфразвукового загрязнения селитебных территорий, прилегающих к транспортным магистралям. *Гигиена и санитария*. 2018. №12. С. 1141-1145.
43. Ascone L., Kling C., Wieczorek J., Koch C., Kühn S. A longitudinal, randomized experimental pilot study to investigate the effects of airborne infrasound on human mental health, cognition, and brain structure. *Scientific reports*. 2021. 11(1). PP. 1-9. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-82203-6>.
44. Chaitidis G.D., Marhavilas P.K., Kanakaris V. Potential Effects on Human Safety and Health from Infrasound and Audible Frequencies Generated by Vibrations of Diesel Engines Using Biofuel Blends at the Workplaces of Sustainable Engineering Systems. *Sustainability*. 2022, 14. P. 7554. <https://doi.org/10.3390/su14137554>.
45. Veldboom E., van der Werf C., Incedalci Z., van den Berg F. The effect of masking noise on persons suffering from a low frequency sound. *Applied Acoustics*. 2022. Volume 191. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2022.108681>
46. Evans T., Cooper J. & Lenchine V. Infrasound levels near windfarms and in other environments. Ironment Protection Authority & Resonate *Acoustics*. 2012. 1-65.
47. Boczar, T., Zmarzły, D., Koziół, M., Nagi, Ł., Wotzka, D., & Nadolny, Z. (2022). Measurement of Infrasound Components Contained in the Noise Emitted during a Working Wind Turbine. *Energies*, 15(2), 597. <https://doi.org/10.3390/en15020597>
48. Monazzam MR, Zakerian SA, Kazemi Z, et al. Investigation of occupational noise annoyance in a wind turbine power plant. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*. 2018; 38(2):798-807. doi:10.1177/1461348418769162
49. Boczar T., Zmarzly D., Koziot M., Wotzka D. The application of time-frequency ridge transformation for the analysis of infrasound signals generated by wind turbines. *Applied Acoustics*. Volume 177, June 2021, 107961. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2021.107961>
50. Stephen E. Keith, Gilles A. Daigle and Michael R. Stinson. Wind turbine low frequency and infrasound propagation and sound pressure level calculations at

dwellings. *The Journal of the Acoustic Society of America* 2018.144, 981; PP. 981-996  
<https://doi.org/10.1121/1.5051331>

51. Emre Barlas, Wei Jun Zhu, Wen Zhong Shen, Kaya O. Dag, Patrick Moriarty. Consistent modeling of wind turbine noise propagation from source to receiver. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2017, 142, 3297.  
<https://doi.org/10.1121/1.5012747>

52. Mihan H. McKenna, Sarah L. McComas, R. Danielle Whitlow, Henry Diaz-Alvarez, Anna M. Jordan, R. Daniel Costley, Christopher P. Simpson. Remote Structural Infrasound: Case Studies of Real-Time Infrastructure System Monitoring. *Journal of Infrastructure Systems*, 27 (3), 04021021, 2021, 10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000623

53. Thiessen, D. J. Rea, D. S. Garcha, C. Cheng and J. E. Young, "Infrasound for HRI: A Robot Using Low-Frequency Vibrations to Impact How People Perceive its Actions," 2019 14th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI), Daegu, Korea (South), 2019, pp. 11-18, doi: 10.1109/HRI.2019.8673172.

54. 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>.

55. Ibarra-Zarate DI, Navas-Reascos G, Padilla-Ortiz A. Passive noise control in buildings: An engineering case study of ducted systems. *Building Services Engineering Research and Technology*. 2021;42(6):751-762. doi:10.1177/01436244211019635

56. Liu X, Liu J, He J, Zhang J. Analysis of the characteristics of noise from substations in buildings. *Building Services Engineering Research and Technology*. 2022;43(1):41-56. doi:10.1177/01436244211035672

57. Sihar I. Numerical modelling of transient low-frequency sound propagation and vibration in buildings. Eindhoven: *Eindhoven University of Technology*. 2022. 213 p.

58. Murphy E., King E. Environmental Noise Pollution. Noise Mapping, Public Health, and Policy. 2nd Edition - April 1, 2022 Paperback ISBN: 9780128201008

59. D. Gužas, R. Viršilas. (2010). Infrasound hazards for the environment and the ways of protection. *Ultragarsas. e-Journal of Nondestructive Testing* Vol. 15(7), pp. 34-37. <https://www.ndt.net/?id=9476>
60. Guzas D., Klimas R. On the development and practical application of the theory of sound insulation of cylindrical shells. ISSN: 1392-2114 *Ultragarsas*. 2006. 58. No. 1. 50-54.
61. Vincenta P., Larsonniera F., Rodrigues D., Durand S. Analytical modelling and characterisation of infrasound generator in the air. *Applied Acoustics*. Volume 148, May 2019, Pages 476-483, <http://dx.doi.org/10.1016/j.apacoust.2018.12.033>
62. Babazadeh, Nasim; Bargstädt, Hans-Joachim. The benefits of building information modelling in construction noise control in the pre-construction phase (a focus on urban area constructions). INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings, InterNoise 22, Glasgow, Scotland, Pages 2999-3998, pp. 3025-3032(8). [https://doi.org/10.3397/IN\\_2022\\_0425](https://doi.org/10.3397/IN_2022_0425)
63. 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>
64. Morano P, Tajani F, Di Liddo F, Darò M. Economic Evaluation of the Indoor Environmental Quality of Buildings: The Noise Pollution Effects on Housing Prices in the City of Bari (Italy). *Buildings*. 2021; 11(5):213. <https://doi.org/10.3390/buildings11050213>
65. Blair, B.D., Brindley, S., Dinkeloo, E. et al. Residential noise from nearby oil and gas well construction and drilling. *J Expo Sci Environ Epidemiol* 28, 538–547 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41370-018-0039-8> H
66. Baoxiang Huang, Zhenkuan Pan, Zunren Liu, Guojia Hou, Huan Yang. Acoustic amenity analysis for high-rise building along urban expressway: Modeling traffic noise vertical propagation using neural networks *Transportation Research Part D*:

*Transport and Environment*, Volume 53, June 2017, Pages 63-77.  
<https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.04.001>

67. Tao, Z., Wang, Y., Zou, C. et al. Assessment of ventilation noise impact from metro depot with over-track platform structure on workers and nearby inhabitants. *Environ Sci Pollut Res* 26, 9203–9218 (2019). <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04378-w>

68. Boyle MD, Soneja S, Quirós-Alcalá L, Dalemarre L, Sapkota AR, et al. (2017) A pilot study to assess residential noise exposure near natural gas compressor stations. *PLOS ONE* 12(4): e0174310. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0174310>

69. Ven-Shing Wang, Ei-Wen Lo, Chih-Hsiang Liang Keh-Ping Chao Bo-Ying Bao b, Ta-Yuan Chang. Temporal and spatial variations in road traffic noise for different frequency components in metropolitan Taichung, Taiwan. *Environmental Pollution*, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.10.055>

70. T. Kihlman, W. Kropp, W. Lang. Quieter Cities of the Future. Lessening the Severe Health Effects of Traffic Noise in Cities by Emission Reductions. A report from The CAETS Noise Control Technology Committee and the International Institute of Noise Control Engineering T. Kihlman, W. Kropp, W. Lang. Göteborg: Reproservice, *Chalmers University of Technology*. – 2014. – 28 p.: <http://www.ta.chalmers.se/>

71. T. Kihlman, W. Kropp, W. Lang. Quieter Cities of the Future. Lessening the Severe Health Effects of Traffic Noise in Cities by Emission Reductions. Source book. Göteborg: Reproservice, *Chalmers University of Technology*. – 2014. – 247 p. – <http://www.ta.chalmers.se/>

72. Babisch W. Updated exposure-response relationship between road traffic noise and coronary heart diseases: A meta-analysis. *Noise Health*. – Vol. 16(68). – 2014. – P. 1–9.

73. Sørensen M, Hvidberg M, Andersen ZJ, Nordsborg RB, Lillelund KG, Jakobsen J, et al. Road traffic noise and stroke: a prospective cohort study. *Eur Heart J*. – Vol. 32. – 2011. – P. 737–744.

74. Mette Sørensen, Zorana J. Andersen, Rikke B. Nordsborg, Thomas Becker, Anne Tjønneland, Kim Overvad, Ole Raaschou-Nielsen. Long-Term Exposure to Road Traffic Noise and Incident Diabetes: *A Cohort Study. Environ Health Perspect.* – Vol. 121. – 2012. – P. 217–222.
75. Поспелов П. И. Борьба с шумом на автомобильных дорогах. – М.: Транспорт, 1981. – 88 с.
76. А.А. Факторович. Г.И Постников. Защита городов от транспортного шума. – К.: Будівельник, 1982. – 144 с.
77. Renez Nota, Robert Barelds, Dirk van Maercke, Hans van Leeuwen. Engineering method for road traffic and railway noise after validation and fine-tuning, Harmonoise WP3, Technical Report HAR32TR–040922–DGMR20– 2005.
78. Wilson D. K. Outdoor sound propagation: recent modeling developments and applications to noise control. 40th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering 2011 (INTER-NOISE 2011), 4-7 Sept. 2011: proceedings – Ottawa, 2009. – 8 p.: <http://www.proceedings.com/06792.html>
79. Zaporozhets, V. Tokarev, K. Attenborough Z. Aircraft noise. Assessment, prediction and control. Spon Press, Great Britain. – 2011. – 414 p.
80. Z.N. Xie M. Gu. Mean interference effects among tall buildings *Engineering Structures.* – Vol. 26. – 2004. – P.1173–1183.
81. Z.N. Xie, M. Gu. Simplified formulas for evaluation of wind-induced interference effects among three tall buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics.* – Vol. 95. – 2007. – P. 31–52.
82. L. Andersen, J. Clausen Impedance of surface footings on layered ground. *Computers and Structures.* – Vol. 86. – 2008. – P. 72–87.
83. M. Buret, K.M. Li, K. Attenborough. Optimisation of ground attenuation for moving sound sources. *Applied Acoustics.* – Vol. 67. – 2006. – P. 135–156.
84. Thorsson Pontus J. Combined effects of admittance optimization on both barrier and ground. *Applied Acoustics.* – Vol. 64. – 2003. – P. 693–711.

85. Dickinson P. J. Measurements of the normal acoustic impedance of ground surfaces. *Sound Vib.* – Vol. 13 (3). – 1970. – P. 309–322.
86. M. Hashemineja, M.A. Alibakhshi. Diffraction of sound by a poroelastic cylindrical absorber near an impedance plane Seyyed. *International Journal of Mechanical Sciences.* – Vol. 49. – 2007. – P. 1–12.
87. H.M. Hess, K. Attenborough, N.W. Heap. Ground characterization by short-ranger propagation measurements. *J. Acoust. Soc. Am.* – Vol. 85(4). – 1990. – P. 1975–1986.
88. Roland Kruse, Volker Mellert Effect and minimization of errors in in situ ground impedance measurements. *Applied Acoustics.* – Vol. 69. – 2008. – P. 884–890.
89. T. Nogamia, K. Konagaib, A. Mikami. Simple formulations of ground impedance functions for rigid surface foundations. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering.* – Vol. 21. – 2001. – P. 475–484.
90. A David W. Craig & James M. Sabatier Pulsed Level Difference Technique for Ground Characterization. *Applied Acoustics.* – Vol. 44. – 1995. – P. 1–6.
91. Jin H. Soh, Kenneth E. Gilbert, Wm. Garth Frazier, Carrick L. Talmadge, and Roger Waxler. A direct method for measuring acoustic ground impedance in long-range propagation experiments. *J. Acoust. Soc. Am.* – Vol. 128(5). – 2010.
92. O. Zaporozhets, V. Tokarev. Aircraft noise modelling for environmental assessment around airports. *Applied Acoustics.* – Vol. 55(2). – P. 99–127.
93. O. Zaporozhets, V. Tokarev, K. Attenboroug. Aircraft noise. Assessment, prediction and control. Spon Press, Great Britain. – 2011. – 414 p.
94. Шевченко Ю.С. Метод картографування шуму від транспортних потоків у сучасному місті. *Вісник Національного авіаційного університету.* – 2012. – № 4(53). – С. 242–247.
95. Шевченко Ю.С. Аналіз формул розрахунку ефективності акустичних екранів на вулицях. *Вісник Національного авіаційного університету.* – 2010. – № 4(45). – С. 94–99.

96. Shevchenko Yu. New Ranking Method of Traffic Noise Reduction Measures. *Proceedings of National Aviation University*. – 2013.– № 3. – p. 105–111.
97. Шевченко Ю. С. Математична модель шуму транспортних потоків. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. – 2014.– № 4/4 (70). – С. 47–51.
98. Ю. С. Шевченко, О. М. Береговий, В. Г. Паращанов. Моделювання впливу фасаду будівлі на формування звукового поля. *Вісник Національного авіаційного університету* – 2012.– № 1 (50). – С. 242–247
99. М. В. Коротченко, Ю. С. Шевченко. Дослідження ефективності акустичних екранів на автомобільних дорогах України. *Науково-виробничий журнал*. – 2012.– № 6 (230). – С. 40–42.
100. Cussen K, Garruccio S, Kennedy J. UAV Noise Emission—A Combined Experimental and Numerical Assessment. *Acoustics*. 2022; 4(2):297-312. <https://doi.org/10.3390/acoustics4020018>
101. 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)
102. S. Secchi, et al. Experimental and environmental analysis of new sound-absorbing and insulating elements in recycled cardboard. *J. Build. Eng.* 5, 1-12 (2016)
103. 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*. 2023. Issue No. 110. PP. 245-255. <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2023.110.245-255>
104. 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>

105. Бурдейна Н.Б. Наукові засади моніторингу та нормалізації рівнів фізичних факторів у закладах вищої освіти: дис. доктора технічних наук: спец. 05.26.01 - Охорона праці, Київ, 2024, 396 с.

106. L. Levchenko, N. Ausheva, N. Karaieva, V. Glyva, & N. Burdeina, (2024). *MODELING OF THE EXTERNAL MAGNETIC FIELD OF ELECTRIC MACHINES. Advanced Information Systems*, 8(1), 24–30. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2024.1.03>

107. Основи акустичної екології: навчальний посібник для студентів вузів. В.С. Дідковський, В.Я. Акіменко, О.І. Запорожець та інш. – Кіровоград: Імекс, 2002. – 520 с.

108. Справочник по защите от шума и вибрации жилых и общественных зданий. В. И. Заборов [и др.] ; под ред. В. И. Заборов. - Киев : Будивэльнык, 1989. - 160 с. : рис., табл. - (Охрана окружающей среды). - Библиогр.: с. 155-156. - ISBN 5-7705--0162-6 Указ. табл.: с. 157-158.

**СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА**

1. N. Burdeina, V. Glyva, L. Levchenko, G. Krasnianskyi, Y. Biruk, S. Zozulya, L. Zozulya, M. Kashlev, T. Grzelakowski. (2025). Innovative Approaches to Designing Sound Insulation in Historic Buildings during Reconstruction. *International Journal of Conservation Science*, Volume 16, Special Issue. pp. 373-382, DOI: 10.36868/IJCS.2025.si.01
2. 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>
3. Glyva, V., Kashlev, M., Tkachuk, K. 2024. Дослідження рівнів шуму при реконструкції й відновленні будівель і визначення заходів його зниження. Системи управління, навігації та зв'язку. *Збірник наукових праць*. 4, 78 (Лис 2024), 184-186 <https://doi.org/https://doi.org/10.26906/SUNZ.2024.4.184>
4. Глива В. А., Кашлев М. С. Екранування шуму будівельного обладнання. Системи управління, навігації та зв'язку. *Збірник наукових праць*. 2(80), 2025, с 222-225, doi: 10.26906/SUNZ.2025.1.222-225
5. Глива В. А., Кашлев М. С. 2025. Дослідження ефективності тонких шумозахисних екранів в умовах обмежених просторів. Системи управління, навігації та зв'язку. *Збірник наукових праць*. 4 (82), с. 160-163, doi: 10.26906/SUNZ.2025.4.160-163
6. Глива В.А., Левченко Л.О., Кашлев М.С. Моніторинг інфразвукового навантаження на території, прилеглі до об'єктів енергетики. *Екологія. Ресурси. Енергія: тези доп. міжнар. наук.-прак. конференції*, м. Київ, 22-24 листопада 2023 р. Київ, 2023. с. 112-113 [https://www.knuba.edu.ua/wp-content/uploads/2023/11/jere\\_2023\\_program\\_tezu.pdf](https://www.knuba.edu.ua/wp-content/uploads/2023/11/jere_2023_program_tezu.pdf)
7. V. Glyva, S. Zozulya, M. Kashlev. Investigation of the spectral composition

of construction machinery noise and development of a methodology for improving the effectiveness of protective equipment. REPORTS of the 5th INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND PRACTICAL CONFERENCE ENERGY. RESOURCES. ECOLOGY, November 27-29, 2024, KYIV, p. 106.

8. Grygorii Krasnianskyi, Oleg Besarab, Mykhailo Kashlev, Denys Khomenko. Prediction of sound absorption characteristics of porous materials. REPORTS of the 6th INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND PRACTICAL CONFERENCE ENERGY. RESOURCES. ECOLOGY, December 3-5, 2025, KYIV, p. 86-87



### ПРОТОКОЛ

випробувань шумозахисних матеріалів, розроблених за результатами дисертаційного дослідження Кашлева М.С. «Засоби зниження будівельного шуму при відновленні та реконструкції будівель і споруд»

Випробування виконувалися з використанням каліброваного обладнання у заглушеній (ревербераційній) камері. Умови випробувань виключали сторонній вплив на результати вимірювань. Вимірювання здійснювалися у октавних смугах частот.

Тестувалася перфорована панель завтовшки 10 мм з нерегулярним розташуванням отворів діаметром 10 мм із середньою щільністю розташування отворів на відстанях 25 мм між їх центрами. Розміри панелі 2,25×1,75 м. Індекси зниження звуку наведено у таблиці 1.

Таблиця 1

Індекси зниження рівнів звуку перфорованою панеллю

$f$ , Гц	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000
$\Delta L$ , дБ	5	7	12	34	25	28	43	38

Результати випробувань резонансної панелі, налаштованої на частоту 2500 Гц наведено у таблиці 2.

Таблиця 2

Індекси зниження рівнів звуку резонансною панеллю

$f$ , Гц	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000
$\Delta L$ , дБ	4	5	6	8	10	18	44	35

Результати випробувань пористого матеріалу завтовшки 30 мм наведено у таблиці 3.

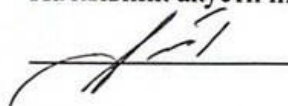
Таблиця 3

## Коефіцієнти поглинання пористого матеріалу

$f$ , Гц	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000
$\alpha$	0,30	0,25	0,25	0,5	0,78	0,92	0,94	0,95

Середні індекси зниження інфразвуку у діапазоні 2 –16 Гц склали 8–10 дБ з лінійною шкалою.

Начальник акустичної лабораторії НДВ-12 ДП НДІ «Система»

 Олександр КОСТЕРОВ



МОН  
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ

просп. Повітряних Сил, 31,  
м. Київ, 03037  
тел.: +38 (044) 248-32-65,  
e-mail: knuba@knuba.edu.ua,  
web: knuba.edu.ua  
ЄДРПОУ 02070909

### ДОВІДКА

#### про впровадження у навчальний процес результатів дисертаційного дослідження Кашлева Михайла Сергійовича

Цією довідкою посвідчуємо, що результати дисертаційного дослідження Кашлева Михайла Сергійовича на тему «Засоби зниження будівельного шуму при відновленні та реконструкції будівель і споруд», поданого на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 263 Цивільна безпека, впроваджено у навчальний процес кафедри технологій захисту навколишнього середовища та охорони праці і кафедри фізики факультету інженерних систем та екології Київського національного університету будівництва і архітектури.

Результати дисертаційного дослідження впроваджено у навчальний процес при викладанні курсу «Фізика. Фізика навколишнього середовища», спеціальностей G2 Технології захисту навколишнього середовища, E2 Екологія та при викладанні фізики для здобувачів освіти спеціальностей G19 Будівництво та цивільна інженерія в розділі основ будівельної акустики. Матеріали дисертаційного дослідження використовуються при підготовці докторів філософії за спеціальністю K10 Цивільна безпека при викладанні курсу «Цивільна безпека. Наукові та практичні аспекти реалізації».

На основі результатів дисертаційного дослідження оновлено тематику лекційних і практичних занять.

Результати дослідження мають практичне значення для професійної підготовки фахівців у сфері цивільної безпеки та будівництва і цивільної інженерії.

Проректор з НМР



Андрій ШПАКОВ