

В. А. Глива¹, В. М. Гусев², Я. І. Бірук¹, М. С. Кашлев¹

¹ Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна

² Морський фаховий коледж Херсонської державної морської академії, Херсон, Україна

ЗАСАДИ ЗНИЖЕННЯ РІВНІВ НИЗЬКОЧАСТОТНОГО ЗВУКУ ТА ІНФРАЗВУКУ У ВИРОБНИЧИХ ТА ПОБУТОВИХ УМОВАХ

Анотація. Показано, що традиційні звукопоглинальні матеріали неефективні для зниження рівнів низькочастотного звуку та інфразвуку. Для нормалізації цих факторів потрібне розроблення спеціальних захисних конструкцій. Тому доцільне дослідження можливості розроблення як конкретних засобів захисту працюючих та населення від впливу низькочастотного звуку та інфразвуку у конкретних умовах, так і формування загальних засад забезпечення нормативних значень цих факторів. Розроблено вимоги до захисних конструкцій. Головними з них є: застосування звукоізоляційних конструкцій не повинне змінювати основні робочі параметри пристроїв або технологічних процесів; параметри звукоізоляційних конструкцій повинні забезпечувати достатній рівень захисту людей; технології виготовлення захисних конструкцій повинні бути економічно прийнятними. Надано розрахунковий апарат щодо визначення акустичного навантаження на середовище. Показано особливості і надано розрахунки щодо визначення навантаження на середовище низькочастотного звуку та інфразвуку. Надано функції щодо розрахунку параметрів захисних панелей резонансного типу для зниження рівнів низькочастотного звуку та інфразвуку. Недоліком таких конструкцій є налаштування на одну резонансну частоту. При цьому наголошено, що усі наведені співвідношення є емпіричними. Тому реальні показники щодо резонансної частоти за обраних параметрів конструкції можуть суттєво відрізнятись. Це вимагає забезпечення певної широкосмуговості захисної конструкції. Для забезпечення прийняттого захисту в області низьких та інфразвукових частот доцільна двошарова панель. Друга панель налаштовується на резонансну частоту, відмінну від першої. Ці частоти обираються за результатами натурних вимірювань і повинні мати найбільші амплітуди у визначеному діапазоні частот. Внутрішня панель робиться перфорованою. Це знижує добротність коливальної системи та робить панель більш широкосмуговою. Проміжок між панелями доцільно заповнювати шумопоглинальними матеріалами, наприклад гранульованим пінополістиролом. Це забезпечує зниження рівня шуму в усьому звуковому діапазоні. Певними недоліками пропонованих конструкцій є необхідність конструювання для конкретних умов – розмірів приміщення, площі стіни тощо.

Ключові слова: низькочастотний звук, інфразвук, резонанс, захисна панель.

Вступ

Зниження акустичного навантаження на виробниче та побутове середовище є одним з пріоритетних напрямів досліджень і розробок у галузі цивільної безпеки. Складовими такого навантаження є звукові коливання низької частоти та інфразвук. Цим факторам приділяється недостатньо уваги через їх менше сприйняття органами слуху або несприйняття інфразвукових коливань. В той же час вони несприятливо впливають на здоров'я та самопочуття людини, що підтверджено низкою сучасних гігієнічних досліджень [1, 2]. Тому низькочастотний звук та інфразвук потребує нормування за амплітудними значеннями [3]. Втім більшість досліджень констатують наявність проблеми та визначають вплив цих факторів на здоров'я працюючих та населення. Майже відсутні роботи щодо заходів та засобів зниження рівнів низькочастотного звуку та інфразвуку. Певним чином це обумовлене складністю вирішення таких задач. Низькочастотний звук та інфразвук мають низьке просторове згасання і майже не екрануються будівельними матеріалами та шумозахисними конструкціями. Вважається, що найбільш дієвим засобом зниження їх амплітуд значень є ліквідація або зменшення генерації у джерелі. Але механічне обладнання дуже різноманітне, у тому числі і низькочастотні обертальні механізми. До того ж їх балансування з метою уникнення низькочастотної складової складне. Тому доцільно дослідити можливість розроблення як конкретних засобів зниження поширення

низькочастотних механічних коливань, так і загальних підходів до зниження амплітудних значень низькочастотного звуку та інфразвуку у виробничих та побутових умовах.

Огляд літературних джерел. Моніторинг рівнів низькочастотного звуку та інфразвуку свідчать, що їх еквівалентні значення поблизу транспортних магістралей досягають 90 – 100 дБ за лінійною шкалою [4, 5].

Аналогічні дані отримані для силових трансформаторів у населених пунктах [6].

Генерацію цих факторів досліджено у лабораторних умовах та визначено модельні закономірності їх поширення [7, 8].

Але практично усі ці роботи рекомендують уникнути генерації низькочастотних коливань. Тільки поодинокі дослідження пропонують конкретні технічні рішення. Так, у роботі [9] пропонується комплексний підхід до екранування електромагнітних полів та широкосмугового шуму багатошаровими покриттями. Але це прийнятно для захисту окремих будівель і вимагає великої площі та товщини конструкції.

Частково засіб мінімізації низькочастотного звуку надано у роботі [10]. Але ці рекомендації мають окремий характер і стосуються приміщень з комп'ютерною технікою.

У дослідженні [11] представлено результати проектування захисних конструкцій резонансного типу.

Такі конструкції проектуються для конкретного приміщення з визначеними частотами звуку найбіль-

ших амплітуд. Тому доцільно розробити загальні засади технічного зниження амплітуд низькочастотного звуку та інфразвуку.

Мета роботи – розроблення загальних засад зниження рівнів низькочастотного звуку та інфразвуку у виробничих та побутових умовах.

Викладення основного матеріалу

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 проєктування захисної конструкції можна умовно розділити на три групи:

1. Застосування звукоізолюючої конструкції не повинне змінювати основні робочі параметри пристроїв або технологічних процесів. Такі зміни повинні перебувати принаймні у допустимих межах.

2. Параметри звукоізолюючих конструкцій повинні забезпечувати достатні, з точки зору охорони праці і безпеки життєдіяльності, коефіцієнти звукоізоляції.

3. 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 проєктування 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:

$$L_p = L + 10 \lg S_p.$$

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:

$$R = L - L_0 + 5,$$

$$R = L_p - L_0 - 10 \lg S_p + 5,$$

де L_0 – 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 вигородок 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 підвищуються. 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'ємності швидкості.

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

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 радіуса з об'ємною швидкістю $V(t)$. Звуковий тиск p , який створює мале пульсуюче тіло на відстані r .

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

де ρ_n – густина повітря, $\omega = 2\pi f$ – циклічна частота, k – хвильове число у повітрі, V_0 – амплітуда об'ємної швидкості.

Ефективність зниження рівня звуку конструкцією:

$$R = 20 \lg \left| \frac{P_m}{P_k} \right|,$$

де P_m та P_k – амплітуди звукового тиску відкритого та ізолюваного механізму.

На низьких частотах, у тому числі і інфразвукових, ефективними є резонансні панелі. Це плоскі 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:

$$f_p = 0,16c\sqrt{\frac{\rho}{md}},$$

де c – швидкість звуку у повітрі, ρ – густина повітря, m – питома поверхнева маса, d – товщина повітряного проміжку.

У випадку дифузного падіння пружної хвилі приблизне значення резонансної частоти:

$$f_p = 85\sqrt{md},$$

Для зниження рівнів інфразвуку доцільно застосувати мембранні поглиначі енергії. Вони є конструкцією, у якій гнучкий матеріал натягнутий на жорсткий каркас.

Резонансна частота таких конструкцій визначається зі співвідношення:

$$f_p = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{F}{\rho tl^2 b}},$$

де F – сила тяжіння мембрани; ρ – 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 ширококутовою.

Резонансна частота перфорованої панелі розраховується із співвідношення:

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

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 неврівноваженості 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 :

$$L = 10\lg N + 20\lg n + I_0.$$

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 застосувати 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.

Висновки

1. Зниження рівнів звуку та інфразвуку можливе за рахунок застосування спеціальних конструкцій резонансного типу. Це обумовлено неефективністю у низькочастотній області спектра звукопоглинальних матеріалів та низьким поглинанням цих частот будівельними та конструкційними матеріалами.

2. Наданий розрахунковий апарат дозволяє попередньо оцінити параметри захисної конструкції, виходячи з частот переважної амплітуди. При цьому слід враховувати, що наведені співвідношення є емпіричними, тому реальні резонансні частоти можуть дещо відрізнятись від розрахункових. Обов'язковим є тестування дослідних зразків, виходячи з реальних виробничих умов.

3. Загальним недоліком резонансних конструкцій для зниження рівнів низькочастотного

звуку та інфразвуку є налаштованість на одну переважну частоту. Для забезпечення певної широкосмуговості конструкції доцільно застосовувати дві паралельні панелі, налаштовані на різні частоти. За умови застосування перфорації на одній з панелей

добротність коливальної системи значно знижується, що розширює смугу поглинання. Заповнення проміжку між панелями звукопоглинальним матеріалом забезпечує шумопоглинання в усьому звуковому діапазоні.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. 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)
2. 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>.
3. Myshchenko I., Nazarenko V., Stopa M., Maslakiewicz M. OCCUPATIONAL EXPOSURE TO INFRASONIC AND LOW FREQUENCY NOISE: ACTUAL PROBLEMS OF HYGIENIC STANDARDIZATION. *Український журнал Охорона праці*. 2021. 17 (4). PP. 235-244. <https://doi.org/10.33573/ujoh2021.04.235>.
4. Кузнецова Е.Б., Булавина И.Д. Особенности мониторинга инфразвукового загрязнения селитебных территорий, прилегающих к транспортным магистралям. *Гигиена и санитария*. 2018. №12. С. 1141-1145.
5. Гагарин С.А., Рожихин Н.С., Романов Л.И. Трамвай как источник низкочастотного звука и инфразвука. *Вестник Удмуртского университета. Экологические проблемы и природопользование*, т. 25, выпуск 4. 2015. С. 7-13.
6. Зинкин В.Н., Солдатов С.К., Богомолов А.В., Драган С.П. Актуальные проблемы защиты населения от низкочастотного шума и инфразвука. *Технологии гражданской безопасности*. 2015. Том 12. № 1 (43). С. 90-96.
7. Müller L., Kropp W., Zachos G., Forssén J. Investigating Low Frequency Sound from Traffic in a Living Room Lab. *Fortschritte der Akustik*, 2021. 4 p.
8. Sihar I. Numerical modelling of transient low-frequency sound propagation and vibration in buildings. Eindhoven: Eindhoven University of Technology. 2022. 213 p.
9. Nazarenko V.I., Leonov Yu.I., Glyva V.A., Burdeina N.B., Cherednichenko I.M., Pochta V.N., Holubeva A.O. The influence of UV-LED lamps radiation on indicators of microflora in university auditoriums. *Ukrainian journal of occupational health*. 2023. Vol. 19. № 1. P. 42-50. <https://doi.org/10.33573/ujoh2023.01.042>
10. Glyva V., Kasatkina N., Levchenko L., Tykhenko O., Nazarenko V., Burdeina N., Panova O., Bahrii M., Nikolaiev K., Biruk Y. Determining the dynamics of electromagnetic fields, air ionization, low-frequency sound and their normalization in premises for computer equipment. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2022, 3(10-117), pp. 47-55. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.258939>.
11. 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>

Received (Надійшла) 29.11.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 31.01.2024

Principles of reducing the levels of low-frequency sound and infrasound in production and domestic conditions

V. Glyva, V. Gusev, Y. Biruk, M. Kashlev

Abstract. Traditional sound-absorbing materials have been shown to be ineffective in reducing low-frequency sound and infrasound levels. The normalization of these factors requires the development of special protective structures. Therefore, it is appropriate to study the possibility of developing both specific means of protecting workers and the population from the impact of low-frequency sound and infrasound in specific conditions, as well as the formation of general principles for ensuring the normative values of these factors. Requirements for protective structures have been developed. The main ones are: the use of soundproofing structures should not change the basic operating parameters of devices or technological processes; parameters of soundproofing structures must provide a sufficient level of protection for people; manufacturing technologies of protective structures must be economically acceptable. A calculation device for determining the acoustic load on the environment is provided. Features are shown and calculations are provided for determining the load on the medium of low-frequency sound and infrasound. Functions are provided for calculating the parameters of protective panels of the resonance type for reducing the levels of low-frequency sound and infrasound. The disadvantage of such structures is the adjustment to one resonant frequency. At the same time, it is emphasized that all the given ratios are empirical. Therefore, the real indicators of the resonant frequency under the selected design parameters may differ significantly. This requires ensuring a certain bandwidth of the protective structure. To ensure acceptable protection in the area of low and infrasound frequencies, a two-layer panel is advisable. The second panel is tuned to a resonance frequency different from the first. These frequencies are selected based on the results of field measurements and should have the largest amplitudes in the specified frequency range. The inner panel is made perforated. This reduces the Q-factor of the oscillating system and makes the panel more broadband. It is advisable to fill the space between the panels with noise-absorbing materials, for example, granulated polystyrene. This provides a reduction in the noise level in the entire sound range. Certain disadvantages of the proposed designs are the need to design for specific conditions – room dimensions, wall area, etc.

Keywords: low-frequency sound, infrasound, resonance, protective panel.