

О. В. Панова<sup>1</sup>, В. Ф. Фролов<sup>1</sup>, Л. О. Левченко<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна

<sup>2</sup> Національний технічний університет України "КПІ імені Ігоря Сікорського", Київ, Україна

## МОНІТОРИНГ НИЗЬКОЧАСТОТНОГО ЗВУКОВОГО ТА ІНФРАЗВУКОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА ВИРОБНИЧЕ СЕРЕДОВИЩЕ ТА ЗАСОБИ ЙОГО ЗНИЖЕННЯ

**Анотація.** Проведено моніторинг низькочастотного звуку та інфразвуку на території міста у октавних смугах частот. Показано, що рівні цього чинника перевищують гранично допустимі значення у автомобільному та міському електричному транспорті. Ненормативні значення інфразвуку спостерігаються поблизу залізничного полотна. Виконано аналіз можливих підходів до зниження рівнів низькочастотного звуку та інфразвуку принаймні усередині будівель. Показано переваги та недоліки резонансних та мембранних панелей для поглинання низькочастотних пружних хвиль. Наведено розрахунковий апарат для визначення поглинальних властивостей конструкцій. Доведено, що для ефективного захисту конструкції повинно налаштуватися на мінімальні пікові частоти, що забезпечує поглинання хвиль вищих кратних ним частот. Запропоновано двошарову конструкцію, налаштовану на дві найбільш критичні звуки та інфразвукові частоти. Додаткове заповнення проміжку між ними та проміжку між конструкцією та поверхнею монтажу (стіна, стеля) стандартним шумопоглинальним матеріалом дозволяє підвищити загальний шумозахист. Надано розрахунок перфорованої шумозахисної панелі, яка застосовується у разі одного суттєвого піку у низькочастотній або інфразвуковій області. Така панель є ефективною, починаючи з частот 100–150 Гц. Запропоновано можливість одночасного зниження рівнів електромагнітних полів. Це досягається за рахунок додавання у проміжний шумопоглинальний матеріал металовмісної субстанції. Це може забезпечуватися застосуванням дрібнодисперсного концентрату залізної руди, який добре імпантується у будь-який матеріал і має низьку вартість. Показана можливість покриття жорстких елементів звукозахисної конструкції спеціальною фарбою для екранування електромагнітних полів широкого частотного діапазону. Це забезпечить захист людей від двох найбільш критичних техногенних фізичних чинників.

**Ключові слова:** звук, інфразвук, резонансна частота, панель, шумопоглинальний апарат.

### Вступ

На сьогоднішній день захисту людей від впливу шуму у виробничих та побутових умовах приділяється багато уваги. Параметри та засоби захисту від акустичних впливів регламентуються загальними будівельними нормами захисту територій, будинків і споруд від шуму, зокрема, проектування засобів звукопоглинання та екранування. Рівні шуму, ультразвуку та інфразвуку у виробничих умовах регламентуються санітарними нормами [1]. Але більшість досліджень щодо визначення фактичних рівнів шумового навантаження стосуються частотних смуг звуку до яких найбільш чутливе людське вухо – 6-8 кГц. Відповідно, засоби захисту також розробляються найбільшою ефективністю на таких частотах. При цьому низькочастотному шуму – 20-500 Гц майже не приділяється уваги. Це ж стосується інфразвукових частот, які не сприймаються органами чуттів, але шкідливі для людського організму. В той же час спостерігається тенденція підвищення амплітудних значень низькочастотних звукових та інфразвукових хвиль у довкіллі та виробничому середовищі. Але найефективніші захисні конструкції, наприклад, у смугах 31,5 та 63 Гц забезпечують індекси зниження шуму 5-15 дБ, що у багатьох випадках є недостатнім. Значною мірою це пояснюється браком достовірних систематизованих даних щодо низькочастотного акустичного фону у відкритому просторі та у виробничому середовищі, а також амплітуд інфразвукових коливань. Наявність таких даних надасть можливість визначити підходи та розробити засоби, захисту від цих фізичних впливів.

**Огляд літературних джерел.** Більшість досліджень щодо зниження впливу на людей низькочастотного звуку та інфразвуку стосуються профілактичних заходів, тобто за рахунок застосування біологічно

активних речовин. Розгляд засобів захисту звичайно або межується констатацією проблеми [2], або моніторингом звукового та інфразвукового навантаження та довкілля або виробниче середовище [3]. У наведених роботах надано багато фактичного матеріалу (натурні вимірювання) та їх методики, але не наведено ефективності засобів або принципів їх розроблення.

У статті [4] представлено засіб захисту від впливу інфразвуку, але це звичайна панель Бекеші без будь-яких змін. Її недоліком є налаштування на резонансну частоту. В той же час коливання зі значними амплітудами можуть спостерігатися на кількох частотах, що є типовим для виробничих умов. Засоби захисту у цьому випадку повинні бути дещо іншими, або просто широкосмуговими. Для розроблення таких засобів необхідно мати достовірні дані щодо низькочастотного звуку та інфразвуку з боку діючого обладнання, транспортних засобів, електротехнічних об'єктів тощо.

**Метою роботи** є визначення джерел низькочастотного звуку та інфразвуку критичних амплітуд та розроблення засад проектування засобів захисту від їх впливу.

### Викладення основного матеріалу

Дослідження виконувалися із застосуванням натурних вимірювань. Вимірювання здійснювалися за допомогою каліброваного шумоміра Октава 110А у режимах «Звук» та «Інфразвук». У процесі досліджень оцінювалася критичність низькочастотного звуку та інфразвуку, генерованого різними джерелами та найбільш вагомі частоти (амплітудні значення). На першому етапі вимірювалися фонові рівні низькочастотного звуку та інфразвуку на території міста на великих відстанях від потенційних джерел шуму (табл. 1). Вимірювання до частоти 16 Гц здійснювалися за шкалою «Лін», 25 Гц і вище – «А». На наступ-

ному етапі було виміряно рівні низькочастотного звуку та інфразвуку найбільш поширених джерел (табл. 2,  $P$  – рівні звукового тиску, дБ;  $C$  – смуги переважних значень, Гц). Достовірні фактичні значення рівнів інфразвуку визначати достатньо складно.

Таблиця 1 – Фонові рівні низькочастотного звуку та інфразвуку на території міста

Частота, Гц	2	4	8	16	25	50	100	200	250
Фон, дБ	39	37	40	44	50	53	47	40	38

Таблиця 2 – Характеристики джерел низькочастотного звуку та інфразвуку

Джерело	$P$	$C$
Міський автотранспорт (у салоні)	85-120	4,0-31,5
Міський електротранспорт (у салоні)	75-82	2,0-20,0
Метрополітен (підземна ділянка)	92-110	4,0-31,5
Метрополітен (відкрита ділянка)	78-85	4,0-31,5
Залізничний транспорт (біля полотна)	88-110	8,0-50,0
Трансформатор (на території забудови)	75-85	2,0-50,0
Комп'ютерн. час (заняття, 10 роб. місць)	65-78	2,0-50

Постійний інфразвук нормується за рівнем звукового тиску у октавних смугах частот 2, 4, 8, 16 Гц. Нормованими характеристиками непостійного інфразвуку є еквівалентні за енергією рівні звукового тиску  $L_{екв}$ . (дБ) у октавних смугах частот та еквівалентний загальний рівень звукового тиску у дБ Лін.

Еквівалентні за енергією рівні звукового тиску інфразвуку у стандартних октавних -смугах частот ( $L_{екв}$ ) та еквівалентний загальний рівень звукового тиску (дБ Лін.) визначаються за співвідношенням:

$$L_{екв} = 10 \lg \left( \frac{1}{T} \right) \sum_{i=1}^n t_i 10^{0,1L_i} ,$$

де  $T$  – період вимірювання, год;  $t_i$  – час впливу звуку з рівнем  $L_i$ , год;  $L_i$  – логарифмічний рівень інфразвуку у  $i$ -й проміжок часу, дБ;  $n$  – загальна кількість проміжків впливу інфразвуку.

Для орієнтовного визначення суттєвої присутності інфразвуку можна використовувати загальний рівень звуку, виміряний за шкалою «Лін.» та шкалою «А». Різниця показників  $L_{Лін} - L_A$  свідчить про рівень присутності інфразвуку. Вважається, що за різниці до 10 дБ присутність інфразвуку несуттєва; до 20 – помірно виражена; до 30 – суттєва; більше 30 дБ – критична. Наведене обумовлене тим, що інфразвук зазвичай супроводжується інтенсивним шумом. Але у реальних умовах нормативні рівні інфразвуку можуть генеруватися за нормативних рівнів звуку. Відомо, що захист від низькочастотних акустичних впливів, у тому числі і інфразвуку, дуже складний. Навіть сучасні засоби індивідуального захисту для частот звуку нижче 500 Гц неефективні (індекси зниження шуму не перевищують 15-12 дБ). У першу чергу це обумовлене великими довжинами звукових хвиль. Для інфразвуку довжина пружних хвиль більша за 21 м. У таких умовах традиційні шумопоглинальні матеріали не ефективні. Відомо, що найкращим засобом зниження амплітуд низькочастотних акустичних хвиль є мембранні поглиначі (щити Бекеші). Але їх недоліками є ефективність на одній (резонансній) частоті. У реальних

умовах таких (переважних) частот кілька. Тому потрібно розглянути можливість зниження амплітуд усієї низькочастотної смуги. У загальному випадку коефіцієнт звукопоглинання  $\alpha$  визначається як:

$$\alpha = 1 - \left( \frac{\rho_M v_M - 413}{\rho_M v_M + 413} \right)^2 ,$$

де 413 – питомий акустичний опір повітря,  $\rho_M v_M$  – питомий акустичний опір поглинаючого матеріалу ( $\rho_M$  – густина матеріалу,  $v_M$  – швидкість звуку у ньому). Ця формула справедлива для нормального падіння хвилі. Для ефективної дії площа поверхні повинна бути дуже великою (принаймні перевищувати довжину падаючої хвилі). Це неприйнятно для дуже низьких та інфразвукових частот. Для цих частот частково (за великих розмірів) можна застосувати резонансні панелі. Їх резонансну частоту  $v_0$  можна розрахувати за співвідношенням:

$$v_0 = \frac{v_n}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho_n}{md}} ,$$

де  $v_n$  – швидкість звуку у повітрі,  $\rho_n$  – густина повітря,  $m$  – маса одиниці поверхні панелі,  $d$  – товщина повітряного зазору між панеллю та площиною закріплення (стіною або іншою твердою поверхнею).

Але у цьому випадку за інфразвукових частот поверхнева маса  $m$  для інфразвукових частот повинна складати кілька десятків кілограмів.

Враховуючи наявність сучасних полімерних матеріалів високої міцності і малої товщини, для скранування низькочастотних звукових хвиль можливо застосувати мембранні панелі. Їх власну частоту коливань можна розрахувати таким чином:

$$v_0 = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{F}{\rho_M ab}} ,$$

де  $F$  – сила натягнення мембрани;  $l$ ,  $a$ ,  $b$  – довжина, ширина і товщина мембрани;  $\rho_M$  – густина матеріалу мембрани.

Із сучасних матеріалів цілком можливо виготовити захисну конструкцію з індексом зниження низькочастотного звуку та інфразвуку до 25–30 дБ. Але така ефективність досягається тільки на власній (переважній) частоті. В умовах наявності кількох пікових частот конструкцію необхідно ускладнити. Слід відзначити, що для мембранних поглиначів резонансне поглинання відбувається на усіх частотах  $v_k = k v_0$ , де  $k$  – натуральне число.

Тому необхідно проектувати конструкції з переважними найменшими резонансними частотами. Вони визначаються вимірюванням рівнів низькочастотного звуку та інфразвуку і обранням частот найбільших амплітуд. Доцільно обрати одну інфразвукову та одну звукову частоти. У цьому випадку на першому етапі обираються потрібні у даному конкретному випадку розміри панелі (довжина  $l$  та ширина  $a$ ). Підбиранням матеріалу ( $\rho_M$ ), його товщини та натягнення ( $F$ ) конструкція налаштовується на потрібну частоту. За наявності двох мембран можливо перекрити практично усю низькочастотну смугу.

гу. Додатковим засобом зниження рівнів звуку високих частот є заповнення проміжку між мембранами та проміжком між мембраною та поверхнею монтажу (стіною) стандартними звукопоглинальними матеріалами. Попередні розрахунки і експерименти показали, що від такої конструкції не можна очікувати зниження рівнів звукового тиску більш ніж на 20–25 дБ, але з огляду на дані Таб. 2 це є прийнятним для більшості виробничих умов.

Досвід свідчить, що для забезпечення нормативних умов праці необхідно проводити повний акустичний моніторинг виробничого середовища з урахуванням рівнів інших фізичних чинників (наприклад, електромагнітної обстановки).

Якщо вимірювання показують один суттєво виражений інфразвуковий пік, то замість однієї мембранни доцільно використати перфоровану панель (з лицевого боку конструкції). Її переважна резонансна частота визначається зі співвідношення:

$$v_p = \frac{v_n}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{b_{ef} d^2 h}},$$

де  $v_n$  – швидкість звуку у повітрі;  $S$  – переріз отворів,  $b_{ef}$  – ефективна товщина листа,  $b_{ef} = \Delta + 0,5\sqrt{\pi S}$ ,  $\Delta$  – товщина листа,  $d$  – відстань між отворами,  $h$  – відстань від поверхні монтажу. Така структура ефективна для частот звуку більших за 100–150 Гц.

Перевагою двохшарової конструкції є можливість додавання у звукопоглинальний наповнювач проміжку металовмісної субстанції для додаткового екранування електромагнітних полів широкого частотного діапазону [9]. Застосований у цій роботі

залізорудний концентрат має низьку вартість і легко додається до будь-якого матеріалу. Одним з варіантів є покриття жорсткої поверхні фарбою, призначеною для екранування електромагнітних хвиль [10].

Наведений підхід надасть змогу знизити вплив на людей у виробничих та побутових умовах найбільш критичних фізичних чинників техногенного походження.

## Висновки

1. Моніторинг низькочастотного звуку та інфразвуку з боку найпоширеніших джерел шуму показав перевищення гранично допустимих рівнів у автомобільному та електричному транспорті та їх значні рівні біля трансформаторних підстанцій найбільш поширених потужностей.

2. Наведено прості у застосуванні розрахунки щодо проектування захисних конструкцій для зниження амплітудних значень низькочастотного звуку та інфразвуку. Розроблено методологічний підхід для проектування двошарової резонансної конструкції для одночасного зниження рівнів низькочастотного звуку та інфразвуку з одночасним зниженням акустичного впливу усього частотного діапазону

3. Запропоновано підхід до одночасного зниження впливу на людей у виробничих та побутових умовах акустичних та електромагнітних полів техногенного походження. Це досягається додаванням у проміжний звукопоглинальний пружний наповнювач металовмісної феромагнітної субстанції та покриття жорстких елементів акустичної панелі спеціальною фарбою для екранування електромагнітних полів широкого частотного діапазону.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку: ДСН 3.3.6.037-99.-[Чинний від 1999-01-12]. - К.: МОЗ України, 1999. – 29 с.- (Державні санітарні норми України).
2. Zinkin V., Soldatov S., Bogomolov A., Dragan S., Actual problems of Population Protection from the Low-Frequency Noise and Infrasound. Civil Security Techology, vol. 12. 2015. №1. pp. 90-96.
3. Boczar T, Zmarzly D, Koziol M, et al. Measurement of Infrasound Components Contained in the Noise Emitted during a Working Wind Turbine. Energies. 2022; 15(2), no pp. 1-18. <https://doi.org/10.3390/en15020597>
4. Васильев А.В. К вопросу о снижении негативного воздействия инфразвукового излучения в условиях урбанизированных территорий, Машиностроение и машиноведение, 2020, № 5., с. 69-73

Received (Надійшла) 23.12.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 02.03.2022

## Monitoring of low-frequency sound and infrasound load on the production environment and means of reducing IT

O. Panova, L. Levchenko, V. Frolov

**Abstract.** The monitoring of low-frequency sound and infrasound in the city in octave frequency bands was carried out. It is shown that the levels of this factor exceed the maximum allowable values in road and urban electric transport. Non-normative values of infrasound are observed near the railway line. An analysis of possible approaches to reducing the levels of low-frequency sound and infrasound at least inside buildings. The advantages and disadvantages of resonant and membrane panels for the absorption of low-frequency elastic waves are shown. The calculation apparatus for determining the absorbing properties of structures is given. It is proved that for effective protection the structure must be tuned to the minimum peak frequencies, which ensures the absorption of waves of higher multiples of frequencies. A two-layer design tuned to the two most critical sound and infrasound frequencies is proposed. Additional filling of the gap between them and the gap between the structure and the mounting surface (wall, ceiling) with standard sound-absorbing material allows to increase the overall noise protection. The calculation of the perforated noise protection panel, which is used in the case of one significant peak in the low-frequency or infrasonic region, is given. Such a panel is effective from 100 to 150 Hz. The possibility of simultaneous reduction of electromagnetic field levels is proposed. This is achieved by adding a metal-containing substance to the intermediate sound-absorbing material. This can be ensured by the use of fine iron ore concentrate, which is well implanted in any material and has a low cost. The possibility of coating rigid elements of the soundproof structure with a special paint for shielding electromagnetic fields of a wide frequency range is shown. This will protect people from the two most critical man-made physical factors.

**Keywords:** sound, infrasound, resonant frequency, panel, sound-absorbing device.