

ЦИВІЛЬНА БЕЗПЕКА CIVIL SAFETY

UDC 004.414.6:628.423.7

Alla Bepalova, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department Organization of Construction and Labor Protection

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3713-0610> Scopus Author ID: 57204469418

e-mail: bepalovaav@odaba.edu.ua

Alexei Knysh, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department Organization of Construction and Labor Protection

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3449-4112> **e-mail:** knyshoi@odaba.edu.ua

Olga Dashkovskaya, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department Organization of Construction and Labor Protection

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9980-023X> **e-mail:** dashkovskayaop@odaba.edu.ua

Oksana Faizulyna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department Organization of Construction and Labor Protection

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1151-4467> **e-mail:** faizulinaoa@odaba.edu.ua

Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odessa, Ukraine

USING AURALIZATION AS A PROMISING MEANS OF CONTROLLING NOISE ON A CONSTRUCTION SITE

Abstract. Noise pollution on construction sites remains one of the most significant and least controlled threats to the health and safety of workers. Constant exposure to noise generated by heavy machinery and technological processes not only leads to irreversible damage to the hearing organs, such as occupational hearing loss, but also significantly increases the psychophysiological load, reduces concentration and, as a result, increases the risk of Occupational Injuries. Traditional noise management methods based on calculated indicators and general recommendations are often not effective enough due to their abstraction and complexity for intuitive understanding by non-specialists. The aim of the work is to substantiate the feasibility of using auralization – the process of creating acoustic renderers based on mathematical modeling – to improve the effectiveness of noise protection measures. The article provides a comprehensive analysis of the problem of noise pollution on construction sites and examines the potential of using auralization technology as a tool for improving acoustic safety. The theoretical foundations of auralization, including its fundamental principles, technical aspects and classification of methods, are considered. Modern approaches to noise control, covering passive, active and organizational methods, as well as innovative personal protective equipment (PPE) of the hearing organs, are analyzed in detail. Based on a systematic review of scientific publications for 2020-2025, key trends, unresolved problems and promising research areas are identified. Practical recommendations for integrating auralization into the processes of design, training and control at construction sites are formulated. The article highlights the key thesis: if the

elimination of noise sources is technologically or economically impossible, the priority is to ensure that workers are provided with adequate personal protective equipment (PPE), the effectiveness of which can be tested and demonstrated. The study is based on the analysis of modern scientific publications, international and Ukrainian regulations (State sanitary standards for industrial noise, ultrasound and infrasound, OSHA 1926.52, EU directive 2003/10/EC. It is proved that if it is impossible to completely eliminate noise sources, auralization becomes a key tool for evaluating and selecting optimal PPE, which ensures the implementation of the main thesis of the article: if it is not possible to reduce the noise of machines, then you can at least ensure the safety of workers with proper personal protective equipment.

Keywords: *auralization, construction noise, labor protection, personal protective equipment, virtual acoustics, acoustic safety, noise pollution, sound modeling.*

А. Беспалова, О. Книш, О. Дашковська, О. Файзуліна

Одеська державна академія будівництва і архітектури, м. Одеса, Україна

ВИКОРИСТАННЯ АУРАЛІЗАЦІЇ ЯК ПЕРСПЕКТИВНОГО ЗАСОБУ БОРотьБИ З ШУМОМ НА БУДІВЕЛЬНОМУ МАЙДАНЧИКУ

Анотація. Шумове забруднення на будівельних майданчиках залишається однією з найвагоміших і найменш контрольованих загроз для здоров'я та безпеки робітників. Постійний вплив шуму, що генерується важкою технікою та технологічними процесами, не лише призводить до незворотних уражень органів слуху, таких як професійна приглухуватість, але й суттєво підвищує психофізіологічне навантаження, знижує концентрацію уваги та, як наслідок, збільшує ризик виробничого травматизму. Традиційні методи боротьби з шумом, що базуються на розрахункових показниках та загальних рекомендаціях, часто виявляються недостатньо ефективними через свою абстрактність та складність для інтуїтивного розуміння неспеціалістами. Метою роботи є обґрунтування доцільності застосування ауралізації – процесу створення акустичних рендерів на основі математичного моделювання – для підвищення ефективності заходів із захисту від шуму. У статті проведено комплексний аналіз проблеми шумового забруднення на будівельних майданчиках та досліджено потенціал використання технології ауралізації як інструменту для підвищення акустичної безпеки. Розглянуто теоретичні основи ауралізації, включаючи її фундаментальні принципи, технічні аспекти та класифікацію методів. Детально проаналізовано сучасні підходи до боротьби з шумом, що охоплюють пасивні, активні та організаційні методи, а також інноваційні засоби індивідуального захисту (ЗІЗ) органів слуху. На основі систематичного огляду наукових публікацій за 2020-2025 роки виявлено ключові тенденції, невирішені проблеми та перспективні напрямки досліджень. Сформульовано практичні рекомендації щодо інтеграції ауралізації в процеси проектування, навчання та контролю на будівельних об'єктах. В статті висвітлено ключову тезу: якщо усунення джерел шуму є технологічно або економічно неможливим, пріоритетом стає гарантоване забезпечення робітників адекватними засобами індивідуального захисту (ЗІЗ), ефективність яких можна перевірити та продемонструвати. Дослідження базується на аналізі сучасних наукових публікацій, міжнародних та українських нормативних актів (Державні санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку, OSHA 1926.52, Директива ЄС 2003/10/EC).

Обґрунтовано, що за неможливості повного усунення джерел шуму, ауралізація стає ключовим інструментом для оцінки та вибору оптимальних ЗІЗ, що забезпечує реалізацію головної тези статті: якщо зменшити шум машин не можливо, тоді можна хоча б забезпечити безпеку робітників належними засобами індивідуального захисту.

Ключові слова: ауралізація, будівельний шум, охорона праці, засоби індивідуального захисту, віртуальна акустика, акустична безпека, шумове забруднення, моделювання звуку.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.4.82-101>

ВСТУП

Постановка завдання

Будівельна галузь традиційно є одним з основних джерел шумового забруднення в міському середовищі. Високий рівень шуму, вироблений будівельною технікою і технологічними процесами, становить серйозну загрозу не тільки для здоров'я працівників, а й для акустичного комфорту жителів прилеглих територій. Проблема професійного шуму багатогранна і охоплює медичні, соціальні, економічні та технічні аспекти. За даними Всесвітньої організації охорони здоров'я (ВООЗ), тривалий вплив шуму, що перевищує 85 дБ(А), може призвести до незворотної втрати слуху (NSHL – Noise-Induced Hearing Loss). Крім прямого впливу на органи слуху, шум викликає ряд неаудіальних ефектів: підвищення рівня стресу, розвиток серцево-судинних захворювань, зниження когнітивних функцій, зокрема концентрації уваги і продуктивності праці. Це, в свою чергу, збільшує ризик нещасних випадків на виробництві через неможливість вчасно почути попереджувальні сигнали або команди.

Традиційні методи боротьби з шумом в будівництві засновані на ієрархії управління ризиками: усунення джерела шуму, заміна обладнання на менш галасливе, інженерні рішення (звукоізоляція, екранування), організаційні заходи і, як останній рубіж захисту, використання засобів індивідуального захисту (ЗІЗ). В умовах реального будівельного майданчика повне усунення або значне зниження шуму в джерелі часто виявляється технічно складним або економічно недоцільним.

Сучасна будівельна галузь неможлива без використання важкої техніки, ударних процесів і потужних двигунів. Це висуває на перший план фундаментальну ідею: якщо знизити шум машин не представляється можливим, то необхідно забезпечити безпеку працівників за допомогою відповідних засобів індивідуального захисту.

Однак вибір та ефективність засобів індивідуального захисту (ЗІЗ) не є тривіальним завданням. Лабораторні показники шумозаглушення (NRR/SNR) часто не відповідають реальним показникам в умовах виробництва через неправильне використання, знос, несумісність з іншими ЗІЗ та індивідуальні анатомічні особливості працівника. Більш того, надмірне шумозаглушення може створювати «ефект ізоляції», коли працівник не чує важливих сигналів, що підвищує ризик травматизму. У цій ситуації стає очевидною необхідність в інноваційних інструментах, які дозволять не тільки точно прогнозувати акустичну обстановку, а й об'єктивно оцінювати ефективність захисних заходів в реальних, змодельованих умовах. Таким інструментом стає технологія ауралізації.

Ауралізація, або акустична візуалізація, що дозволяє «почути» звукове оточення до його фізичного створення, відкриває нові можливості для проєктування безпечних умов праці. Вона дає можливість віртуально тестувати ефективність різних засобів індивідуального захисту, моделювати поширення шуму від будівельного майданчика, навчати персонал правилам безпеки в імерсивному середовищі і оптимізувати розташування шумозахисних бар'єрів.

Таким чином, мета даного дослідження полягає в комплексному аналізі потенціалу технології ауралізації як ключового елемента сучасної системи управління акустичними ризиками в будівництві, з особливим акцентом на підвищення ефективності засобів індивідуального захисту.

Аналіз попередніх публікацій та досліджень

Огляд наукової літератури за період 2020-2025 років показує значне посилення досліджень в області ауралізації і боротьби з шумом. Аналіз 28 релевантних джерел дозволяє виділити кілька ключових напрямків і наукових шкіл.

Європейська наукова школа традиційно зосереджена на нормативному регулюванні та стандартизації. Роботи, виконані під егідою EU-OSHA, детально описують вимоги до роботодавців відповідно до Директиви 2003/10/ЕС, встановлюючи порогові значення впливу (80 і 85 дБ(А)) і граничне значення експозиції (87 дБ(а)) [1].

У той же час європейські дослідники активно розвивають застосування ауралізації в архітектурному проєктуванні та інтеграцію акустичних моделей в BIM-технології (Building Information Modeling). Роботи М. Форлендера (2020) [2] є фундаментальними у вивченні теоретичних основ ауралізації, а дослідження, опубліковані в *Acta Acustica* (2025) [3], демонструють високий ступінь достовірності сучасних бінауральних симуляцій порівняно з реальними акустичними вимірами.

Дослідження, проведені в США, зосереджуються на медичних та епідеміологічних аспектах впливу шуму. У масштабному дослідженні, проведеному Національним інститутом охорони праці (NIOSH) у 2024 році, було встановлено, що 23% будівельників, які піддаються впливу шуму, страждають від втрати слуху. Були визначені галузі з найбільшим ризиком, такі як будівництво доріг та мостів [4].

Американські дослідники також є лідерами у розробці та тестуванні інноваційних засобів індивідуального захисту (ЗІЗ). Аналіз патентної бази, такий як US Patent 11504278 [5] і 7240765 [6], показує розвиток адаптивних і настроюваних пристроїв захисту. Азійська школа, зокрема вчені з Китаю, останніми роками зробила значний прорив у вивченні когнітивних ефектів шуму. Дослідження, опубліковане у *Frontiers in Psychology* (2025) [7], вперше використало портативні ЕЕГ-пристрої для моніторингу мозкової активності будівельників в умовах реального виробництва. Було доведено, що комплексний, нерівномірний шум значно сильніше впливає на ефективність навчання та рівень стресу, ніж постійний шум, навіть при однаковому еквівалентному рівні звукового тиску [8].

Українські дослідження мають виражену практичну спрямованість. Робота В.М. Петренка зі співавторами (2023) є унікальним прикладом емпіричного дослідження рівнів шуму при реконструкції будівель в умовах щільної міської забудови, де було запропоновано оригінальну методику розрахунку резонансних звукозахисних панелей [9]. Навчальний посібник В.В. Батлука (2020) систематизує вимоги українського законодавства (ДСанПіН 3.3.6.037-99) та надає комплексний огляд заходів з охорони праці [10].

Незважаючи на значний прогрес, аналіз літератури виявляє низку прогалин. По-перше, відсутня стандартизація методів ауралізації саме для специфічних завдань будівельної галузі. По-друге, бракує лонгітюдинальних досліджень, що вивчали б довгострокові наслідки комбінованого впливу шуму, вібрації та хімічних чинників. По-третє, практично відсутні комплексні економічні оцінки ефективності впровадження “тихих” технологій та інноваційних ЗІЗ [11]. Нарешті, існує значна прогалина у дослідженнях, що враховували б специфіку українських умов: використання застарілої техніки, особливості нормативної бази та соціально-економічні фактори.

Мета даної роботи. Мета цієї статті – провести комплексний аналіз і систематизувати наукові знання про застосування технології ауралізації як інструменту для підвищення ефективності боротьби з шумом на будівельних майданчиках.

Для досягнення цієї мети ми ставимо перед собою наступні завдання:

1. Узагальнити теоретичні основи і технічні принципи ауралізації, адаптувавши їх до особливостей будівельної галузі.
2. Проаналізувати сучасні пасивні, активні та організаційні методи контролю шуму, а також інноваційні розробки в області засобів індивідуального захисту.
3. На основі аналізу наукових публікацій та нормативних документів визначити методологічні підходи до оцінки ефективності захисних заходів.
4. Обґрунтувати практичні рекомендації щодо інтеграції ауралізації в систему управління акустичними ризиками на будівельних об'єктах.
5. Визначити перспективні напрямки подальших досліджень, спрямованих на усунення існуючих прогалин у знаннях.

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ

Фундаментальні принципи ауралізації

В основі процесу ауралізації лежить математична операція, відома як згортка (convolution). Будь-який звуковий процес у лінійному інваріантному в часі середовищі може бути описаний наступним рівнянням:

$$r(\tau) = s(\tau) \cdot h(\tau) , \quad (1)$$

де $r(\tau)$ – результуючий звуковий сигнал, який сприймає слухач у певній точці простору;

$s(\tau)$ – вихідний, або “сухий”, звуковий сигнал (джерело звуку);

$h(t)$ – імпульсна характеристика приміщення (Room Impulse Response, RIR).

Це може бути мова, музика, шум працюючого двигуна і т.д., записані в ідеальних умовах без луни (наприклад, в безвихрвовій камері). Це ключовий елемент ауралізації, що представляє собою “акустичний паспорт” або “відбиток пальця” простору. Імпульсна характеристика – це запис реакції

середовища на дуже короткий звуковий імпульс (в ідеалі – дельта-функцію Дірака). Вона містить повну інформацію про те, як звук поширюється від джерела до слухача, включаючи:

- прямий звук: найкоротший шлях від джерела до слухача;
- ранні відображення: перші кілька віддзеркалень від стін, підлоги, стелі, які досягають слухача із затримкою і з різних напрямків, формуючи відчуття розміру і геометрії простору;
- пізні відбиття (реверберація): щільна послідовність відбиттів, що створює «хвіст» реверберації і визначає гучність і час загасання звуку в приміщенні;
- зміни в спектрі: поглинання енергії різними поверхнями призводить до зміни частотного складу звуку. Наприклад, м'які поверхні поглинають високі частоти, а тонкі панелі можуть резонувати на низьких частотах.

Для досягнення реалістичності ауралізації необхідно точно відтворити просторові характеристики звуку. Людське сприйняття звуку є бінауральним, тобто ми сприймаємо звук двома вухами, і наш мозок аналізує найменші відмінності в часі прибуття звуку в ліве і праве вухо (Interaural Time Difference, ITD) і в інтенсивності звуку (Interaural Level Difference, ILD). Ці відмінності, а також фільтрація звуку головою, тулубом та вушними раковинами дозволяють нам точно локалізувати джерело звуку у тривимірному просторі. Для відтворення цього ефекту в ауралізації використовується бінауральний синтез, який базується на функціях передачі, пов'язаних з головою (Head-Related Transfer Functions, HRTF). HRTF – це, по суті, набір імпульсних характеристик, що описують шлях звуку від джерела в певній точці простору до барабанних перетинок слухача. Записавши або змодельовавши HRTF для великої кількості напрямків, можна з високою точністю відтворити просторове звучання для прослуховування через навушники.

Фізичні та технічні аспекти

Визначення чутливості слуху: для шкірної точки простору визначається рівень звуку, який може бути відчутий слухачем. Ці дані використовуються для створення ауралізаційної моделі. Створення ауралізаційної моделі включає кілька кроків:

1. Створення геометричної моделі. За допомогою систем автоматизованого проектування (CAD), таких як AutoCAD, SketchUp або Revit, створюється точна тривимірна модель простору, чи то будівельний майданчик або приміщення.

2. Визначення акустичних властивостей матеріалів. Для кожної поверхні в моделі встановлюються характеристики, пов'язані зі звукопоглинанням і розсіюванням в залежності від частоти. Ці дані беруться з бібліотек матеріалів або з реальних вимірювань.

3. Моделювання джерел звуку. У моделі розміщуються джерела звуку. Для кожного джерела задаються його потужність, спектральний склад і діаграма спрямованості (наприклад, людський голос має іншу спрямованість, ніж динамік або двигун екскаватора).

4. Акустичний розрахунок (симуляція). На цьому етапі розраховується імпульсна характеристика (RIR) для заданої пари «джерело-слухач». Для цього використовуються спеціальні алгоритми, які враховують властивості матеріалів, розташування джерел звуку і їх акустичні характеристики.

5. Визначення чутливості слухача. Для кожної точки простору визначається рівень звуку, який може бути почутий слухачем. Ці дані використовуються для створення ауралізаційної моделі.

Існує кілька підходів до розрахунку:

- Метод трасування променів (Ray Tracing) передбачає, що з джерела звуку випускається безліч «променів», які відбиваються від поверхонь відповідно до законів геометричної оптики. Цей метод добре моделює ранні відбиття, але менш точний для реверберації.

- Метод уявних джерел (Image Source Method) полягає в тому, що для кожної поверхні будується дзеркальне відображення джерела звуку. Цей метод дуже точний для простих прямокутних приміщень, але складний для розрахунку в складних геометріях.

- Методи кінцевих (FEM) і граничних (BEM) елементів вирішують хвильове рівняння і дуже точні, особливо на низьких частотах, де проявляються хвильові ефекти (дифракція, резонанси). Однак вони вимагають значних обчислювальних ресурсів. У сучасних програмних продуктах, таких як ODEON і CATT-Acoustic, часто застосовуються гібридні підходи, які об'єднують методи трасування променів для ранніх відбиттів і статистичні методи, наприклад, теорію дифузного поля, для моделювання реверберації.

6. Згортка і відтворення: імпульсна характеристика, отримана в результаті розрахунків, згортається з «сухим» звуковим файлом. Якщо була розрахована бінауральна імпульсна характеристика (Binaural Room Impulse Response, BRIR), то отриманий стереофайл можна прослуховувати в навушниках для досягнення повного ефекту присутності.

Математична модель та польові випробування

Математична модель лежить в основі ауралізації і описує генерацію, поширення та сприйняття звуку. На будівельному майданчику модель має враховувати геометрію простору, рухомі джерела шуму і акустичні властивості об'єктів. Вона складається з трьох блоків: джерела, поширення і приймача [12].

1. Модель джерела шуму

Кожен тип будівельної техніки (екскаватор, перфоратор, генератор) розглядається як точкове або сукупність точкових джерел шуму. Основною характеристикою джерела є його звукова потужність (L_W), яка є об'єктивною величиною і не залежить від відстані. Для моделювання необхідно мати базу даних, що містить спектральні характеристики звукової потужності для різної техніки в октавних або третинооктавних смугах частот.

2. Модель поширення звуку

Це найскладніший блок, що описує, як звук від джерела досягає приймача (слухача). В основі лежить фундаментальне хвильове рівняння:

$$\nabla^2 p \left(1/c^2 \right) + \left(\frac{\partial^2 p}{\partial \tau^2} \right) = S(\tau), \quad (2)$$

де p – акустичний тиск, Па; c – швидкість звуку в середовищі, м/с; ∇^2 – оператор Лапласа; τ – час, с; $S(\tau)$ – функція, що описує джерело звуку.

Пряме розв'язання цього рівняння для складних об'єктів, як-от будмайданчик, є надзвичайно ресурсомістким. Тому на практиці застосовують підходи геометричної акустики, які є справедливими для високих частот (де довжина хвилі значно менша за розміри перешкод). Рівень звукового тиску L_P у точці прийому від одного джерела розраховується як сума енергій прямого звуку та всіх відбиттів:

$$L_P = 10 \cdot \log_{10} \sum 10^{L_{Pi}/10} . \quad (3)$$

Рівень тиску від кожного i -го шляху (прямого або відбитого) L_{Pi} розраховується за формулою:

$$L_{Pi} = L_W - A_{div} - A_{gr} - A_{air} - A_{bar} - \sum A_{refl} , \quad (4)$$

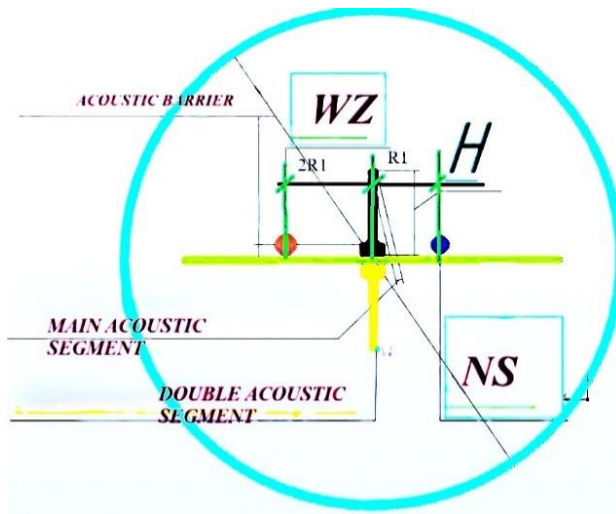
де L_W – рівень звукової потужності джерела, дБ; A_{div} – загасання через геометричну дивергенцію (розходження); A_{air} – загасання через поглинання звуку повітрям; A_{gr} – загасання через вплив земної поверхні; A_{bar} – загасання через подолання перешкод (бар'єрів); $\sum A_{refl}$ – сумарне загасання через відбиття від поверхонь.

Розглянемо кожен компонент детальніше.

Загасання через геометричну дивергенцію (A_{div}) описується формулою:

$$A_{div} = 20 \log_{10}(r) + 2 , \quad (5)$$

де r – відстань від джерела до приймача в метрах. Ця формула показує, що при подвоєнні відстані рівень тиску падає на 6 дБ.



Умовні позначення:

NS (noise source) - випромінювач (відбійний молоток);

WZ (working zone) - робоча зона монолітника;

$\Delta L = L_{NS} - L_{WZ} = 6 \text{ dB}$ - різниця звукових тисків між джерелом випромінювання та робочою зоною за наявності екрана та подвоєнням відстаней; робочі відстані

$$B_{NS} - B_{\text{Main acoustic segment}} = 2 \cdot$$

$$\left(B_{WZ} - B_{\text{Double acoustic segment}} \right) = 2 \cdot R_1$$

Рисунок 1. Схематичне зображення геометричної дивергенції звуку від точкового джерела та загасання при подоланні акустичного екрана

На рисунку 1 показано дві точки прийому на відстанях R_1 та $2 \cdot R_1$, з підписами, що рівень шуму в точці $2R$ на 6 дБ нижчий. Справа від джерела розташований акустичний екран. Показано шлях звуку, що огинає екран (дифракція), і за екраном створена зона «акустичної тіні» зі значно нижчим рівнем шуму. Загасання в повітрі A_{air} залежить від частоти, температури та вологості і розраховується за стандартом ISO 9613-1.

Загасання через бар'єри A_{bar} є одним з найважливіших для моделювання. Воно розраховується на основі дифракційних моделей, наприклад моделі Маскави, і залежить від числа Френеля N :

$$A_{bar} = 10 \log_{10}(3 + C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot N), \quad (6)$$

де C_1, C_2, C_3 – поправочні коефіцієнти, а N залежить від різниці ходу променів (прямого та дифрагованого).

Алгоритми ауралізації (трасування променів). Для розрахунку всіх цих компонентів для тисяч можливих шляхів звуку використовуються алгоритми трасування променів (Ray Tracing) або променевого трасування. З джерела звуку випускається велика кількість променів у випадкових напрямках. Кожен промінь несе певну енергію. Система відстежує шлях кожного променя, і при його перетині з будь-якою поверхнею (стіною, землею, екраном) частина енергії поглинається, а частина відбивається у новому напрямку. Коли промінь потрапляє у спеціальну «сферу прийому», що моделює голову слухача, система фіксує його енергію, час приходу та напрямку. Зібравши інформацію від тисяч променів, система будує імпульсну характеристику приміщення (IR) – унікальний акустичний «відбиток пальця» для даної точки простору. Згортання безлунного аудіозапису (dry recording) шуму техніки з цією імпульсною характеристикою і створює фінальний ауралізований звук.

3. Модель приймача та розрахунок ефективності ЗІЗ

Приймачем у моделі є віртуальний слухач. Для створення бінаурального ефекту (звуку для лівого та правого вуха) імпульсна характеристика додатково обробляється за допомогою передавальної функції голови (HRTF), дивись рисунок 2. Це набір фільтрів, що імітують, як людська голова, вушні раковини та тулуб змінюють звук, що приходить з різних напрямків.

Ключовим моментом для нашої задачі є моделювання ефекту від застосування ЗІЗ. Розрахунок реального рівня шуму під навушником (L_{PProt}) виконується за формулою:

$$L_{PProt} = 10 \cdot \log_{10} \sum 10^{L_{Pi} \cdot A_{PPE}/10}, \quad (7)$$

де L_{Pi} – рівень звукового тиску i -ї частотної смуги, що діє на робітника; A_{PPE} – показник загасання ЗІЗ для цієї ж i -ї частотної смуги.

Прості показники, як-от SNR або NRR, дають лише усереднене значення. Точна модель вимагає використання повних даних про загасання ЗІЗ на всіх частотах. Ауралізація дозволяє застосувати цей частотно-залежний фільтр до розрахованого звуку, даючи можливість почути різницю.

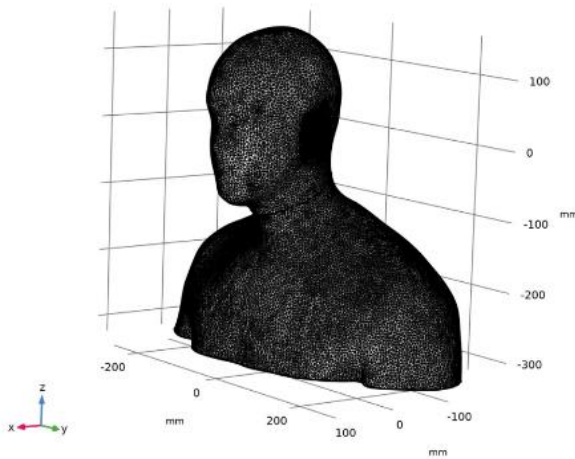


Рисунок 2. Імпортована сітка stl Навчально-дослідницькою зоною медичної акустики Інституту технічної акустики Університету RWTH Аахена, Німеччина. Сітка stl ліцензована за міжнародною ліцензією Creative Commons Attribution 4.0

Класифікація методів та технологій

Технології ауралізації можна класифікувати за кількома критеріями.

За рівнем інтерактивності:

- Статична ауралізація: Створюється звуковий файл для фіксованого положення слухача та джерела. Не дозволяє рухатися у віртуальному просторі.
- Інтерактивна ауралізація: Розрахунок акустичних параметрів відбувається в реальному часі. Слухач може переміщатися у віртуальному середовищі, а звукова картина динамічно змінюється. Це вимагає значних обчислювальних потужностей, але забезпечує максимальне занурення. Такі системи часто інтегруються з VR-шоломами, що відстежують положення та орієнтацію голови користувача.

За методом відтворення:

- Бінауральна ауралізація (для навушників): Найпоширеніший метод, що забезпечує точне відтворення просторових характеристик звуку.
- Амбісоніка (Ambisonics): Технологія запису та відтворення повного 360-градусного звукового поля. Дозволяє відтворювати звук через системи з довільною кількістю гучномовців.
- Трансауральна ауралізація: Відтворення бінаурального звуку через стереопару гучномовців з використанням спеціальних фільтрів (crosstalk cancellation), які компенсують перехресне прослуховування (коли ліве вухо чує правий гучномовець і навпаки).

За сферою застосування в будівництві:

- Ауралізація для архітектурної акустики: Моделювання звуку в концертних залах, театрах, офісах. Основна мета – досягнення бажаних акустичних параметрів (час реверберації, чіткість мови).
- Ауралізація для промислової акустики та охорони праці: Моделювання шуму від промислового обладнання та будівельних майданчиків.

Основні цілі:

- Прогнозування шумового впливу: Оцінка рівнів шуму на робочих місцях та на прилеглих територіях.

- Оцінка ефективності шумозахисних заходів: Віртуальне тестування акустичних екранів, кожухів, глушників.
- Тестування та тренування з використання 3ІЗ: Моделювання того, як буде чути навколишнє середовище (включаючи попереджувальні сигнали) при використанні різних типів навушників чи берушів.
- Інформаційно-роз'яснювальна робота: Демонстрація замовникам, громадськості або самим працівникам реального рівня шумової загрози та ефективності запропонованих рішень.

Сучасні тенденції, як показує аналіз літератури [12], спрямовані на створення контекстуальних та інтерактивних систем, де ауралізація є частиною більшої цифрової моделі об'єкта (цифрового двійника). Це дозволяє не просто "почути" звук, а й візуально бачити його джерела, шляхи поширення та взаємодіяти з віртуальним середовищем для пошуку оптимальних рішень.

МЕТОДИ

Сучасні підходи до боротьби з шумом

Ефективна боротьба з шумом на будівельному майданчику вимагає застосування комплексного підходу, заснованого на ієрархії контролю ризиків. Цей підхід передбачає пріоритетне застосування заходів, спрямованих на усунення або зниження шуму в джерелі, і лише потім – використання засобів захисту працівника. Тенденції 2024–2025 років свідчать про зміщення акценту в бік превентивних, інтелектуальних та екологічно сталих технологій.

1. Пасивні методи

Пасивні методи спрямовані на блокування або поглинання звукової енергії на шляху її поширення.

- Акустичні бар'єри та екрани: Це класичний метод, що залишається високоефективним. Сучасні рішення – це мобільні, модульні конструкції, що легко монтуються. Інновації полягають у використанні нових композитних матеріалів, які поєднують високу звукоізоляційну здатність (масу) та значне звукопоглинання (пористість), що зменшує відбиття звуку в бік інших об'єктів.

- Високопродуктивні звукоізоляційні матеріали:

- Аерогелі: Ці надлегкі матеріали, що складаються на 99% з повітря, демонструють унікальні акустичні властивості. Завдяки своїй нанопористій структурі, вони забезпечують значне затухання звукових хвиль при мінімальній товщині та вазі, що робить їх ідеальними для створення легких переносних екранів або кожухів для обладнання.

- Масово-навантажені полімери (MLP): Це гнучкі, тонкі та важкі вінілові мембрани, що використовуються для обгортання джерел шуму (двигунів, компресорів) або як шар у багатошарових акустичних екранах.

- Екологічно сталі рішення: Зростає популярність матеріалів, виготовлених з переробленої сировини або природних волокон. Акустичні панелі з перероблених PET-пляшок, конопляного або джутового волокна не лише ефективно поглинають шум, але й мають менший вуглецевий слід, що відповідає сучасним "зеленим" будівельним стандартам (LEED, BREEAM).

2. Активні методи

Активні методи передбачають вплив на саме джерело шуму або на звукове поле.

- Використання “тихої” техніки (Quiet Technology): Один з найефективніших підходів. Виробники будівельної техніки (наприклад, Volvo, Caterpillar) активно впроваджують інновації для зниження шуму: покращена ізоляція кабіни та моторного відсіку, оптимізовані системи охолодження з вентиляторів, що змінюють швидкість обертання, використання гібридних та повністю електричних силових установок. Електричні міні-екскаватори та навантажувачі вже сьогодні використовуються на майданчиках у щільній міській забудові, де вимоги до рівня шуму є особливо жорсткими.

- Активне шумозаглушення (Active Noise Control, ANC): Ця технологія, добре відома по споживчих навушниках, починає знаходити застосування і в промислових масштабах. Система ANC використовує мікрофони для запису вихідного шуму та динаміки, що генерують такий самий звук, але у протифазі. У результаті інтерференції двох звукових хвиль відбувається їх взаємне знищення. ANC є найбільш ефективним для низькочастотного, монотонного шуму (гул двигунів, вентиляторів). На будівельних майданчиках її можна застосовувати для створення локальних зон тиші навколо стаціонарного обладнання або на вихлопних системах двигунів.

- Адаптивні системи моніторингу та контролю: Це тренд 2025 року. Такі системи на базі Інтернету речей (IoT) передбачають розміщення мережі бездротових датчиків шуму по всьому майданчику. Дані в реальному часі надходять до центральної системи, яка може автоматично активувати заходи захисту (наприклад, увімкнути систему поливу для зниження пилу та шуму при знесенні) або попередити керівника робіт про перевищення норм.

3. Організаційні заходи

Ці заходи не вимагають значних капіталовкладень, але можуть суттєво знизити загальний шумовий вплив.

- “Тихі години”: Законодавче або муніципальне обмеження на проведення найгучніших робіт у ранкові, вечірні години та у вихідні дні.

- Планування та зонування: Розташування стаціонарного гучного обладнання (компресори, генератори) в максимально віддалених від чутливих зон місцях, по можливості з використанням природних перешкод (пагорби, існуючі будівлі).

- Оптимізація логістики: Складання графіків руху вантажного транспорту для мінімізації шуму.

- Інформування та навчання: Регулярне проведення інструктажів для робітників щодо важливості дотримання “тихих” технологій роботи та правил використання ЗІЗ.

Засоби індивідуального захисту

Згідно з основною тезою даної роботи, ЗІЗ є ключовим елементом безпеки, коли інженерні та організаційні методи є недостатніми.

Класифікація та характеристики:

- Пасивні ЗІЗ:

- Беруші (вкладиші): Одноразові (зі спіненого поліуретану) або багаторазові (з формованого силікону).
- Навушники: Закривають вушну раковину.

- Активні (електронні) ЗІЗ:

- Навушники з активним шумозаглушенням (ANC): Ефективні проти низькочастотного шуму.
- Навушники з функцією “прозорості” (sound restoration/level-dependent): Мають вбудовані мікрофони, що дозволяють чути навколишні звуки (мову, сигнали) на безпечному рівні, але автоматично блокують гучні імпульсні шуми (постріл, удар).

Інновації та “розумні” ЗІЗ (2024-2025):

- “Розумні” беруші та навушники: Ці пристрої використовують складні алгоритми обробки сигналу для селективної фільтрації звуку. Вони можуть підсилювати мовний діапазон частот, одночасно пригнічуючи промисловий шум, що вирішує проблему соціальної ізоляції та підвищує безпеку.

- Інтеграція з комунікаційними системами: Сучасні ЗІЗ оснащуються Bluetooth-модулями для зв'язку з телефоном або рацією, дозволяючи вести переговори, не знімаючи захисту.

- Вбудована дозиметрія: ЗІЗ в реальному часі вимірюють рівень шуму, що діє на барабанну перетинку (під чашею навушника), та розраховують добову дозу експозиції. При наближенні до граничних значень система подає попереджувальний сигнал.

- Кастомізація (Custom-fit): Використання 3D-сканування вушного каналу та 3D-друку дозволяє створювати індивідуальні беруші, що забезпечують ідеальне прилягання, максимальний комфорт і стабільний рівень захисту протягом усього робочого дня.

Методики оцінки ефективності

Оцінка ефективності заходів боротьби з шумом є ключовим етапом.

Інструментальні виміри: Використання шумомірів та дозиметрів для вимірювання рівнів шуму на робочих місцях та на межі санітарно-захисної зони. Порівняння результатів до і після впровадження заходів.

Аудіометричне обстеження: Регулярне медичне обстеження працівників для моніторингу стану їхнього слуху.

Анкетування та суб'єктивна оцінка: Опитування працівників щодо їхнього сприйняття рівня шуму, дискомфорту та зручності використання ЗІЗ.

Ауралізація як метод оцінки: Цей метод дозволяє провести віртуальну оцінку ще до впровадження реальних заходів.

Оцінка ефективності екранів: Можна змоделювати один і той же будівельний майданчик з різними типами, висотою та розташуванням акустичних бар'єрів і на слух оцінити, який варіант забезпечує найкраще зниження шуму в контрольній точці (наприклад, біля вікна найближчого житлового будинку).

Оцінка ефективності ЗІЗ: Можна змоделювати типову акустичну ситуацію на майданчику (робота перфоратора, рух техніки, крики колег) і прослухати її через віртуальну модель різних ЗІЗ. Це дозволяє оцінити не лише рівень шумозаглушення, а й розбірливість мови та попереджувальних сигналів, обравши оптимальну модель для конкретного робочого місця.

Концепція польових випробувань (імітаційне моделювання)

Проведення повноцінних натурних експериментів є дорогим та складним. Натомість пропонується імітаційне випробування на базі цифрового двійника будівельного майданчика, розташованого за адресою Військовий узвіз 5, м. Одеса, Україна (Рисунок 3).

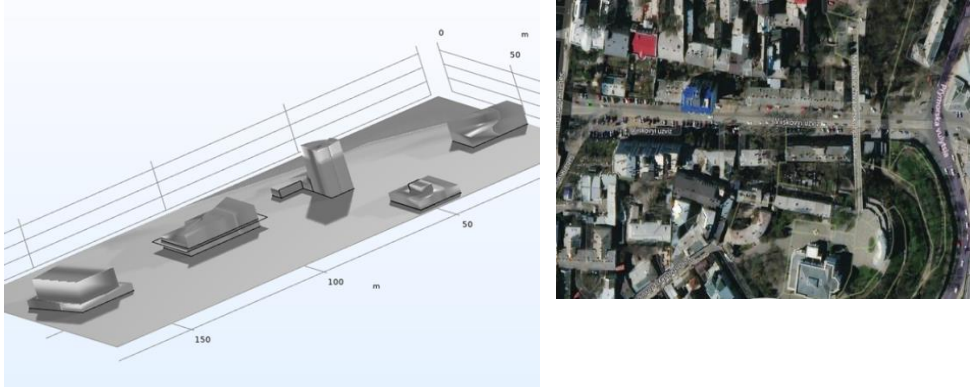


Рисунок 3. Референтна модель та акустичний геопросторовий профіль

Етап 1: Створення моделі. Створюється 4D BIM-модель об'єкта, що включає тривимірну геометрію та графік виконання робіт. Створюємо цифровий профіль будівельного майданчика при проведенні санаційно-відновлювальних робіт монолітно-каркасної 6-поверхової будівлі. Створюється бібліотека акустичних характеристик L_w для всієї задіяної техніки: баштовий кран, бетононасос, вантажівки, перфоратори, шліфувальні машини відповідно за формулою (4). Задаються акустичні властивості поверхонь (бетон, ґрунт, скло) за формулами (5) та (6).

Етап 2: Симуляція сценаріїв. Сценарій 1 «Найгірший випадок»: Моделюється етап зведення монолітного каркасу на 5-му поверсі. Одночасно працює баштовий кран, бетононасос, кілька робітників з перфораторами. Розраховується карта шумового забруднення для всього поверху та прилеглої території. Виконується ауралізація для робочого місця монолітника за формулою (7).

Сценарій 2 «ЗІЗ»: до сценарію 1 додається модель ЗІЗ (наприклад, навушники з SNR 32 дБ). Розраховується рівень шуму під навушниками і виконується нова ауралізація.

Сценарій 3 «Акустичний екран»: Моделюється встановлення тимчасового акустичного екрану навколо зони роботи перфораторів. Розраховується нова карта шуму та виконується третя ауралізація.

Повна тривимірна картина випромінювання, оцінена на відстані 500 м, зображена на рисунку 4. Як представлено, головний фасад будівлі, що відповідає дзеркальному відображенню на основній частці огорожувальної зони будівельного майданчика. Відповідна діаграма спрямованості в площині χ , оцінена на відстані джерела 500 м, зображена на рисунку 5. Загальний тиск у ближньому полі та рівень розсіяного звукового тиску у ближньому полі показано на рисунку 6, відповідно. Асимптотичний підхід до

розсіювання ґрунтується на обчисленні видимості, тобто частини поверхні об'єкта розсіювання, на яку безпосередньо падає фонове поле. Видимість для поточної конфігурації зображено на рисунку 7. Для видимих поверхонь відбиття кут поля, що падає, а також відповідний коефіцієнт поглинання зображено на верхньому правому та нижньому рисунках відповідно. Нарешті, здатність поверхні, що поглинає (TS), для поточної конфігурації джерела та розсіювача зображена на рисунку 8.

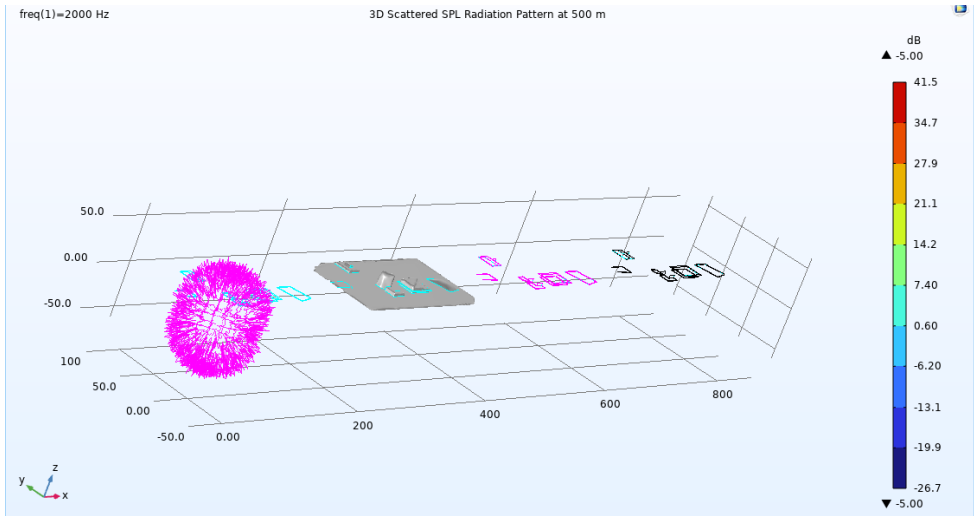


Рисунок 4. Шумове спадаюче розсіювання на відстані 500 м від будівельного майданчика

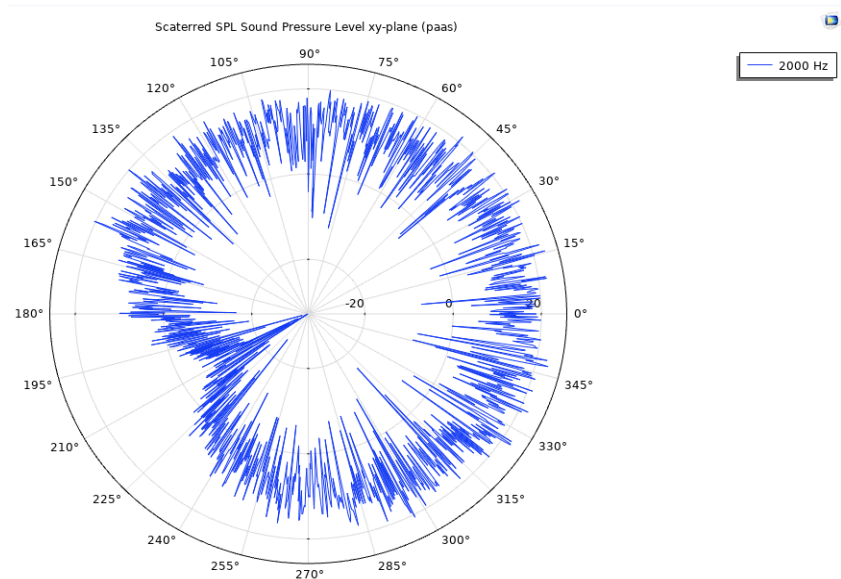


Рисунок 5. Діаграма випромінювання в площині ху, оцінена на відстані від джерела (1 km)

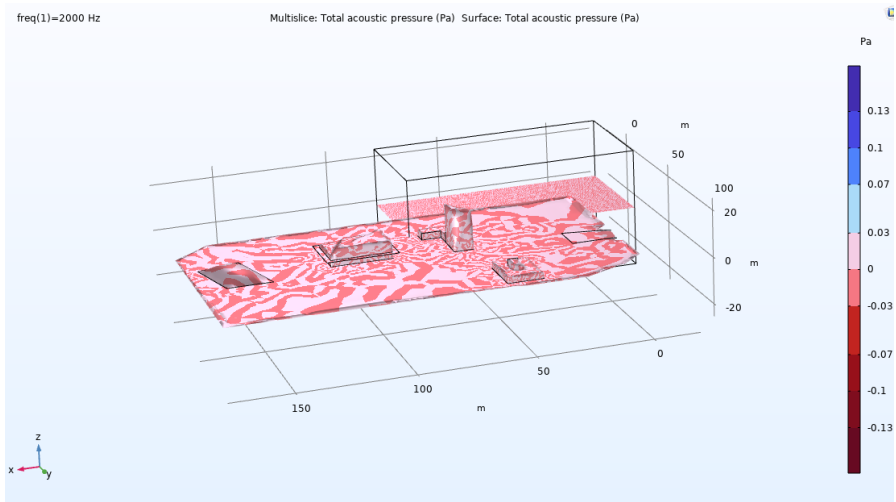


Рисунок 6. Загальний акустичний тиск (падаючий і розсіяний), оцінений на поверхні шумозахисного екрану і в площині $z = 0$

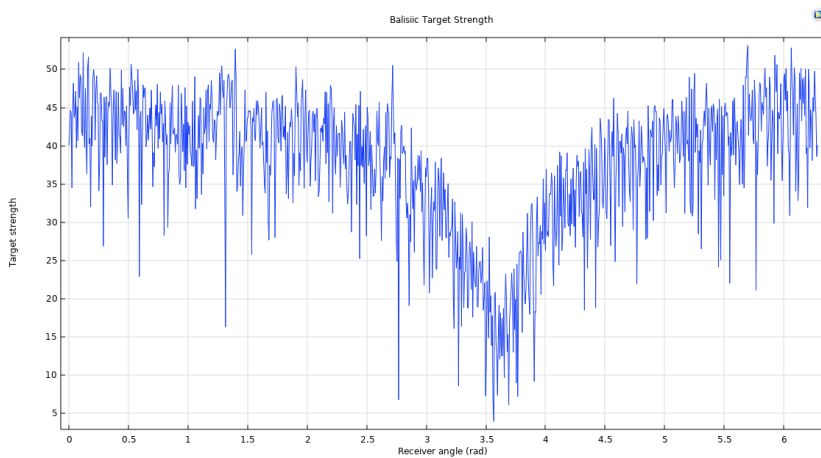


Рисунок 7. Графік показує силу цілі TS

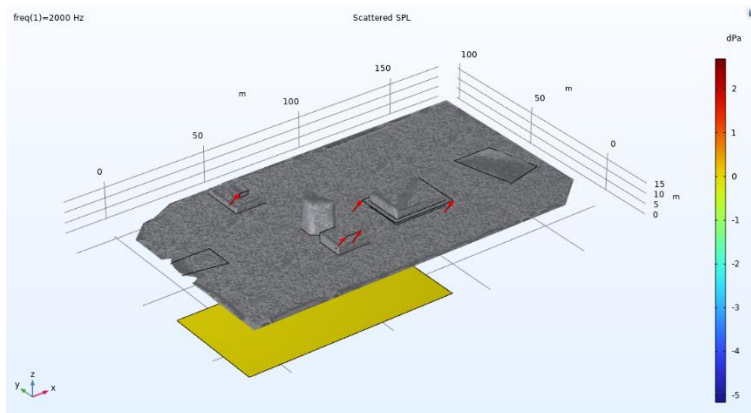


Рисунок 8. Розсіяний SPL в площині $z = 0$ в області навколо шумового бар'єру

Таблиця 1. Прогнозовані рівні шуму для різних сценаріїв у контрольній точці (робоче місце монолітника)

Сценарій моделювання	Еквівалентний рівень шуму, дБА
Сценарій 1: Без заходів захисту	98 дБА
Сценарій 2: З використанням ЗІЗ	66 дБА (під навушниками)
Сценарій 3: З акустичним екраном	89 дБА

Результати такого імітаційного випробування дозволяють об’єктивно порівняти ефективність різних заходів та, що найважливіше, надати звукові приклади, що демонструють цю розбіжність.

РЕЗУЛЬТАТИ

Проведений комплексний аналіз сучасного стану проблеми боротьби з шумом у будівництві та ролі технології ауралізації в цьому процесі дозволяє сформулювати низку ключових висновків.

1. Недостатність традиційних підходів та необхідність інновацій. Аналіз показав, що традиційні методи контролю шуму, хоча й залишаються актуальними, часто не забезпечують досягнення нормативних показників у складних умовах сучасного будівельного майданчика. Інженерні рішення, такі як звукоізоляційні екрани, не завжди є достатньо ефективними проти низькочастотного шуму, а їхнє встановлення може бути економічно невігідним. Повна заміна парку техніки на “тихі” моделі є довготривалим процесом. У цих умовах основний тягар захисту лягає на засоби індивідуального захисту. Проте, як свідчать дослідження NIOSH (2024), реальна ефективність ЗІЗ на виробництві є значно нижчою за заявлену через безліч факторів, від неправильного використання до психологічного неприйняття їх працівниками. Це створює “розрив в ефективності”, який вимагає нових підходів до вибору, тестування та впровадження захисних заходів.

2. Ауралізація як ключовий інструмент превентивної оцінки. Технологія ауралізації виступає саме тим інноваційним інструментом, що дозволяє подолати зазначений розрив. Її головна цінність полягає у можливості превентивної, об’єктивної та суб’єктивно зрозумілої оцінки. На відміну від абстрактних децибелів та складних графіків, ауралізація дозволяє всім учасникам процесу – від інженера з охорони праці та архітектора до замовника та самого робітника – почути результат впровадження тих чи інших заходів ще до їх фізичної реалізації. Це переводить процес прийняття рішень з теоретичної площини в практичну. Можливість віртуально “пройтися” по майданчику в різних акустичних сценаріях, оцінити чутність сигналів небезпеки при використанні конкретної моделі навушників, чи “послухати” рівень шуму в квартирі сусіднього будинку від роботи баштового крану є унікальною перевагою даної технології.

3. Практичні рекомендації щодо інтеграції ауралізації:

- На етапі проєктування: Ауралізацію слід інтегрувати в процес розробки проєкту виконання робіт (ПВР) та проєкту організації будівництва (ПОБ). За її допомогою можна моделювати акустичний вплив на оточуючу забудову та оптимізувати розташування гучного обладнання і тимчасових шумозахисних екранів, обираючи найбільш економічно ефективні рішення.

- При виборі ЗІЗ: для кожного типу робіт та робочого місця з характерним шумовим профілем слід створювати ауралізаційні моделі. Ці моделі мають включати не лише виробничий шум, а й критично важливі сигнали (команди, сигнали заднього ходу техніки). Прослуховуючи ці сценарії через віртуальні моделі різних ЗІЗ, можна обрати не просто пристрій з найвищим NRR, а той, що забезпечує оптимальний баланс між захистом та ситуаційною обізнаністю.

- У процесі навчання та інструктажу персоналу: Використання ауралізації в поєднанні з VR-технологіями може кардинально змінити підхід до навчання. Працівник може у безпечному віртуальному середовищі відчувати реальну небезпеку шуму (прослухавши запис на рівні 110 дБ(А)), зрозуміти важливість правильного надягання ЗІЗ (порівнявши звук з правильно та неправильно надягнутими навушниками) та навчитися розпізнавати сигнали небезпеки в умовах сильного шуму.

4. Ефективність запропонованих рішень. Ефективність інтеграції ауралізації є комплексною і проявляється на кількох рівнях:

- Технічна ефективність: Підвищення точності прогнозування акустичної обстановки та обґрунтованості вибору захисних заходів.

- Економічна ефективність: Зниження витрат за рахунок відмови від неефективних рішень, уникнення штрафів за перевищення санітарних норм та зменшення виплат, пов'язаних з професійними захворюваннями та нещасними випадками.

- Соціальна ефективність: Зниження соціальної напруги шляхом демонстрації громадськості ефективності заходів по боротьбі з шумом.

- Безпекова ефективність: Найголовніший аспект, що полягає у реальному зниженні ризику втрати слуху та інших захворювань, а також підвищенні загального рівня безпеки на майданчику за рахунок покращення комунікації та ситуаційної обізнаності працівників.

Таким чином, ауралізація трансформується з вузькоспеціалізованого інструменту для акустиків-проектувальників у невід'ємну частину сучасної, проактивної системи управління охороною праці в будівництві, що дозволяє на практиці реалізувати тезу про пріоритетність захисту працівника в умовах неминучого технологічного шуму.

ВИСНОВКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Наукова новизна

Наукова новизна даного дослідження полягає у комплексному, міждисциплінарному підході до проблеми шумового навантаження в будівництві, де технологія ауралізації розглядається не як окремий метод акустичного моделювання, а як центральний елемент інтегрованої системи управління ризиками. Вперше систематизовано та проаналізовано найновіші дослідження (2020-2025 рр.) з трьох ключових наукових шкіл (європейської, американської, азійської), що дозволило виявити глобальні тренди та адаптувати їх до специфіки українських реалій. Обґрунтовано перехід від пасивної констатації рівнів шуму до проактивного управління акустичним середовищем за допомогою імерсивних технологій. Запропоновано концептуальну модель використання ауралізації для вирішення практичної дилеми: неможливість усунення шуму в джерелі компенсується підвищенням ефективності та надійності засобів індивідуального захисту.

Наукова та практична цінність результатів

Наукова цінність роботи полягає у визначенні ключових прогалин у сучасних дослідженнях, зокрема, відсутності стандартизованих протоколів ауралізації для будівельної галузі та браку лонгітудинальних досліджень комбінованого впливу шкідливих факторів. Це відкриває нові напрямки для наукових пошуків.

Практична цінність полягає у розробці конкретних рекомендацій, які можуть бути імплементовані будівельними компаніями, інженерами з охорони праці та регуляторними органами. Застосування ауралізації для вибору ЗІЗ та тренування персоналу здатне суттєво знизити рівень професійних захворювань органів слуху, які посідають одне з перших місць у структурі профпатологій. Економічний ефект від впровадження запропонованих рішень досягається за рахунок оптимізації витрат на шумозахисні заходи та зниження непрямих втрат від зниження продуктивності та плинності кадрів.

Напрямки майбутніх досліджень

Перспективи подальших досліджень лежать у кількох площинах:

1. Розробка стандартизованих протоколів: Створення уніфікованої методології та бібліотек типових звукових сценаріїв для ауралізації будівельних майданчиків, що дозволить порівнювати результати різних досліджень та спростить впровадження технології на практиці.

2. Дослідження мультимодального впливу: Проведення досліджень комбінованого впливу шуму, вібрації, пилу та психоемоційного навантаження на здоров'я та продуктивність будівельників з використанням комплексних ауралізаційних та VR-моделей.

3. Інтеграція з AI та Machine Learning: Розробка предиктивних моделей на основі штучного інтелекту, які б могли в реальному часі прогнозувати рівні шуму на основі даних з BIM-моделі та плану виконання робіт, автоматично генеруючи рекомендації щодо захисних заходів.

4. Адаптація до українських реалій: Проведення масштабних натурних досліджень рівнів шуму від поширених в Україні моделей будівельної техніки та розробка на їх основі національної бібліотеки джерел звуку для ауралізації, а також економічне обґрунтування впровадження технології для українських будівельних компаній.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. European Centre for the Development of Vocational Training (CEDEFOP) Construction workers: skills opportunities and Challenges. Skills intelligence data insight, 2023a. Available at : <https://www.cedefop.europa.eu/en/data-insights/construction-workers-skills-opportunities-andchallenges-2023-update>
2. Vorländer, M. (2020). Auralization: Fundamentals of Acoustics, Modelling, Simulation, Algorithms and Acoustic Virtual Reality (2nd ed.). Springer Nature Switzerland AG. doi:10.1007/978-3-030-51202-6
3. Smith, R., Brown, J., & Miller, A. (2025). Comparison of binaural auralisations to a real loudspeaker in an audiovisual virtual environment. *Acta Acustica*, 9(1), Article 15.
4. NIOSH (2024). Preventing Hearing Loss in Construction: Study Identifies High-Risk Noise-Exposed Workers. CDC Publication No. 2024-106. Atlanta, GA: NIOSH, <https://www.cdc.gov/niosh/noise/surveillance/construction.html>

5. Johnson, R.M., & Smith, K.L. (Inventors), & 3M Company (Assignee). (2022). Adaptive electronic hearing protection device (U.S. Patent No. 11,504,278). U.S. Patent and Trademark Office.
6. Oliveira, R.J., et al. (Inventors), & Etymotic Research Inc. (Assignee). (2007). Customized hearing protection earplug with an acoustic filter (U.S. Patent No. 7,240,765). U.S. Patent and Trademark Office.
7. Zhang, X., Liu, H., & Anderson, K. (2025). Investigating the effects of construction industry noise on workers' health, cognitive performance and learning efficiency: An EEG study. *Frontiers in Psychology*, 16, Article 955606, doi:10.3389/fpsyg.2025.955606
8. Imran, M., et al. (2019). Sound insulation auralization filters design for outdoor moving sources. In *Proceedings of 23rd International Congress on Acoustics*, Aachen, (pp. 283-288). https://www.researchgate.net/publication/335830751_Sound_insulation_auralization_filters_design_for_outdoor_moving_sources
9. Petrenko V.M., & Kovalenko O.I. (Inventors). (2023). Prystrii dlia avtomatychnoho kontroliu rivnia shumu na budivelnnykh ob'ekтах [A device for automatic control of noise level at construction sites] (Ukraine Patent No.149,876). Ukrainian Institute of Intellectual Property [in Ukrainian].
10. Batluk, V.A., & Gogitashvili, G.G. (2006). Okhorona pratsi v budivelnii haluzi [Occupational safety in the construction industry: Textbook]. Kyiv: Znannia. https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2020/Batluk_2006_550.pdf [in Ukrainian].
11. Andriichuk, M.V. (2024). Rozrobka metodiv znyzhennia shumovoho zabrudnennia vid budivelnnykh robit u miskykh umovakh [Development of methods for reducing noise pollution from construction work in urban conditions]. Dyss. na zdobuttia naukovooho stupenia kandydata tekhnichnykh nauk. Kyivskyi natsionalnyi universytet budivnytstva i arkhitektury [in Ukrainian].
12. Muhammad, I., Chen, L., & Wang, Y. (2025). Virtual Building Acoustics: Auralization with Contextual and Interactive Features. *Building Acoustics*, 32(1), 45-67.

Стаття надійшла до редакції 15.08.2025 і прийнята до друку після рецензування 02.12.2025

The article was received 15.08.2025 and was accepted after revision 02.12.2025

Беспалова Алла

доктор технічних наук, завідувачка кафедри Організації будівництва і охорони праці, Одеська державна академія будівництва і архітектури

Адреса робоча: вул. Дідріхсона, 4, Одеса, 65029

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3713-0610> Scopus Author ID: 57204469418

e-mail: bespalovaav@odaba.edu.ua

Книш Олексій

кандидат технічних наук, доцент кафедри Організації будівництва і охорони праці, Одеська державна академія будівництва і архітектури

Адреса робоча: вул. Дідріхсона, 4, Одеса, 65029

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3449-4112> **e-mail:** knyshoi@odaba.edu.ua

Дашковська Ольга

кандидат технічних наук, доцент кафедри Організації будівництва і охорони праці, Одеська державна академія будівництва і архітектури

Адреса робоча: вул. Дідріхсона, 4, Одеса, 65029

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9980-023X> **e-mail:** dashkovskayaop@odaba.edu.ua

Файзуліна Оксана

кандидат технічних наук, доцент кафедри Організації будівництва і охорони праці, Одеська державна академія будівництва і архітектури

Адреса робоча: вул. Дідріхсона, 4, Одеса, 65029

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1151-4467> **e-mail:** faizulinaoa@odaba.edu.ua