

Методології дослідження ефективності засобів захисту органів слуху робітників на будівельному майданчику

Methodologies for Studying the Effectiveness of Hearing Protection Equipment for Workers on a Construction Site

Алла Беспалова^A

Corresponding author: доктор технічних наук, професор кафедри, e-mail: bespalovaav@odaba.edu.ua, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3713-0610>

Олексій Книш^A

кандидат технічних наук, доцент кафедри, e-mail: knysnoi@odaba.edu.ua, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3449-4112>

Ольга Дашковська^A

кандидат технічних наук, доцент кафедри, e-mail: dashkovskayaop@odaba.edu.ua, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9980-023X>

Олександр Сіпко^B

старший викладач кафедри, e-mail: sipko_oleksandr@nuczu.edu.ua, ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0000-3675-9121>

Ірина Мельник^B

викладач кафедри, e-mail: sipko_oleksandr@nuczu.edu.ua, ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0000-3675-9121>

Alla Bespalova^A

Corresponding author: Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department, e-mail: bespalovaav@odaba.edu.ua, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3713-0610>

Oleksii Knysn^A

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department, e-mail: knysnoi@odaba.edu.ua, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3449-4112>

Olha Dashkovska^A

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department, e-mail: dashkovskayaop@odaba.edu.ua, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9980-023X>

Oleksandr Sipko^B

Senior Lecturer of the Department, e-mail: sipko_oleksandr@nuczu.edu.ua, ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0000-3675-9121>

Iryna Melnyk^B

Lecturer of the Department, e-mail: sipko_oleksandr@nuczu.edu.ua, ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0000-3675-9121>

^AОдеська державна академія будівництва і архітектури, м. Одеса, Україна

^B Національний університет цивільного захисту України, Черкаси, Україна

^A Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odesa, Ukraine

^B National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkassy, Ukraine

Received: March 19, 2026 | Revised: April 10, 2026 | Accepted: April 30, 2026

УДК 004.414.6:628.423.7

DOI: <https://doi.org/10.33445/sds.2026.16.2.17>

Мета роботи. Розробити та верифікувати комп'ютерну модель оцінювання ефективності засобів індивідуального захисту органів слуху працівників будівельної галузі, зайнятих на роботах із механізованим обладнанням підвищеної шумової інтенсивності, з урахуванням результатів тривалих польових досліджень.

Метод дослідження. Застосовано комплексний підхід, що поєднує аналіз сучасних методів оцінювання ефективності засобів захисту слуху, польові експериментальні дослідження шумового навантаження на будівельних майданчиках і комп'ютерне моделювання акустичних характеристик протишумових засобів. Емпірична частина ґрунтується на трирічних вимірюваннях рівнів шуму на робочих місцях будівельників в Одесі із використанням шумоміра MASTECH MS6701. Чисельне моделювання виконано в інтерфейсі Pressure Acoustics, Boundary Element модуля Acoustics із використанням підходу HRTF.

Результати дослідження. Встановлено, що лабораторні показники шумозаглушення не повною мірою відображають фактичний рівень захисту працівників у реальних виробничих умовах. Підтверджено, що застосування засобів індивідуального захисту органів слуху забезпечує істотне зниження шумового навантаження, проте їх ефективність визначається режимом носіння, правильністю використання та типом засобу. Виявлено розбіжності між декларованим і фактичним використанням протишумових засобів. Результати комп'ютерного моделювання узгоджуються з натурними вимірюваннями.

Теоретична цінність дослідження. Удосконалено підходи до оцінювання ефективності засобів захисту слуху шляхом

Purpose. To develop and verify a computer model for evaluating the effectiveness of hearing protection devices used by construction workers operating mechanized equipment with elevated noise intensity, taking into account the results of long-term field studies.

Method. A comprehensive approach was applied, combining an analysis of current methods for assessing the effectiveness of hearing protection devices, field experimental studies of noise exposure at construction sites, and computer-based modeling of the acoustic characteristics of noise-protective devices. The empirical part was based on three years of noise level measurements at the workplaces of construction workers in Odesa using a MASTECH MS6701 sound level meter. Numerical modeling was performed in the Pressure Acoustics, Boundary Element interface of the Acoustics module using the HRTF approach.

Findings. It was found that laboratory noise attenuation ratings do not fully reflect the actual level of worker protection under real operating conditions. It was confirmed that the use of hearing protection devices provides a significant reduction in noise exposure; however, their effectiveness depends on the wearing regime, correct use, and device type. Discrepancies were identified between the declared and actual use of noise-protective devices. The results of computer modeling are consistent with field measurements.

Theoretical implications. Approaches to evaluating the effectiveness of

поєднання лабораторних, польових і цифрових методів.

Практична цінність дослідження. Результати можуть бути використані для вдосконалення програм збереження слуху, обґрунтованого вибору засобів захисту та зниження ризику професійної приглухуватості.

Оригінальність. Поєднано тривалі польові вимірювання з комп'ютерним акустичним моделюванням реальної ефективності засобів захисту слуху.

Обмеження дослідження. Обмеження пов'язані з варіативністю умов будівельних майданчиків і обмеженим набором досліджених моделей. Подальші дослідження доцільно спрямувати на розширення вибірки та розвиток цифрових моделей оцінювання ризику втрати слуху.

Тип статті. Емпірична з елементами комп'ютерного моделювання.

hearing protection devices were improved through the integration of laboratory, field, and digital methods.

Originality: the study combines long-term field measurements with computer-based acoustic modeling of the actual effectiveness of hearing protection devices.

Research limitations: The limitations are related to the variability of construction site conditions and the limited range of models investigated. Further research should focus on expanding the sample and developing digital models for assessing the risk of hearing loss.

Paper type. Empirical study with elements of computer modeling.

Ключові слова. ослаблення шуму, засоби захисту органів слуху, будівництво, збереження слуху, комп'ютерне моделювання, метод граничних елементів.

Key words. Noise Attenuation, Hearing Protection Devices, Construction, Hearing Conservation, Computer Modeling, Boundary Element Method.

Вступ

Підвищені рівні шуму на будівельному майданчику належать до найбільш поширених шкідливих виробничих чинників, що зумовлюють ризик поступового розвитку професійної приглухуватості у працівників, які експлуатують механізоване обладнання. Традиційно ефективність засобів індивідуального захисту-персональних шумозахисних систем (ЗІЗ-ПШЗС) органів слуху оцінюють за лабораторними показниками шумозаглушення, такими як Noise Reduction Rating (NRR) у США або Single Number Rating (SNR) у Європі. Однак численні дослідження демонструють значний розрив між цими стандартизованими значеннями та реальним рівнем захисту, який працівники отримують в умовах будівельного майданчика. Такий розрив зумовлений багатьма чинниками: неправильним надяганням ЗІЗ-ПШЗС, зносом ущільнювачів, фізичною активністю, а також несумісністю з іншими елементами екіпування. У результаті працівники, формально забезпечені засобами захисту з високим рейтингом, можуть піддаватися впливу небезпечних рівнів шуму, що призводить до поступового розвитку професійної приглухуватості. Це зумовлює необхідність розроблення і валідації таких підходів, які дають змогу об'єктивно оцінювати ефективність ЗІЗ-ПШЗС не лише в лабораторних умовах, а й безпосередньо на робочому місці.

Метою дослідження є створення комп'ютерної моделі ефективності засобів індивідуального захисту слуху працівників будівельної галузі, які обслуговують механізоване обладнання високої шумової інтенсивності. Об'єктом дослідження є процес зниження шумового навантаження на працівника при використанні ЗІЗ-ПШЗС, а предметом – закономірності зміни фактичного рівня захисту залежно від умов носіння засобів захисту та параметрів акустичного поля.

Теоретичні основи дослідження

У відповідь на обмеження лабораторних методів були розроблені системи польової оцінки загасання (Field Attenuation Estimation Systems, FAES), призначені для вимірювання індивідуальної ефективності ЗІЗ безпосередньо на робочому місці. Ключовою технологією, що лежить в основі більшості сучасних FAES, є метод MIRE (Microphone in Real Ear – “мікрофон в реальному вусі”) [2]. Суть методу полягає в одночасному вимірюванні рівня звукового тиску за допомогою двох мініатюрних мікрофонів. Один мікрофон розташовується зовні ЗІЗ-ПШЗС і вимірює рівень зовнішнього шуму, а другий розташовується в вушному каналі, під ЗІЗ, і вимірює рівень шуму, який фактично досягає барабанної перетинки. Різниця між показаннями цих двох мікрофонів, виміряна в режимі реального часу, і являє собою фактичне загасання, що забезпечується ЗІЗ для конкретного працівника в конкретний момент часу. Переваги методу MIRE перед REAT в контексті польових досліджень очевидні. По-перше, він не вимагає участі самого працівника (йому не потрібно сигналізувати про те, чує він звук чи ні), що робить вимір

об'єктивним. По-друге, він дозволяє оцінити ефективність ЗІЗ-ПШЗС в реальній робочій обстановці, з урахуванням всіх супутніх факторів: руху, потовиділення, неправильного надягання і взаємодії з іншого екіпіровкою. По-третє, він дає миттєвий результат, що дозволяє відразу ж скорегувати посадку ЗІЗ-ПШЗС, якщо рівень захисту недостатній. Сучасні системи FAES, засновані на MIRE, такі як 3M™ E-A-ffit™ Dual-Ear Validation System, являють собою портативні пристрої, які дозволяють провести індивідуальне тестування працівника за кілька хвилин, видавши йому персональний коефіцієнт загасання (Personal Attenuation Rating, PAR) [3]. Це значення, на відміну від усередненого та ідеалізованого NRR, відображає реальну, а не теоретичну захист, що дозволяє фахівцям з охорони праці приймати обґрунтовані рішення про допуск працівника в зони з певним рівнем шуму.

Розвиток технологій MIRE призвело до появи ще більш просунутих методологій безперервного моніторингу загасання в реальному часі. Ця концепція реалізується в “розумних” ЗІЗ-ПШЗС, в які парні мікрофони (зовнішній і внутрішній) вбудовані на постійній основі. Такі пристрої безперервно, протягом всієї робочої зміни, обчислюють персональний коефіцієнт загасання (PAR). Це дозволяє відстежувати динаміку зміни ефективності захисту. Наприклад, система може зафіксувати, що в середині зміни через потовиділення і зміщення вушних вкладишів їх ефективність знизилася на 5 дБ, і негайно сповістити про це працівника. Дана технологія перетворює ЗІЗ-ПШЗС з пасивного бар'єру в активну систему моніторингу. Паралельно розвивається технологія персональної дозиметрії шуму “під ЗІЗ”. Традиційні носимі шумоміри вимірюють рівень зовнішнього шуму, і для оцінки реального впливу на працівника з цього значення віднімається лабораторний показник NRR, що, як ми з'ясували, некоректно[4]. Нові системи, що використовують технологію MIRE, вимірюють фактичну дозу шуму, отриману працівником, вже з урахуванням реального загасання, що забезпечується ЗІЗ-ПШЗС. Внутрішній мікрофон, розташований у вушному каналі, інтегрує рівень звукового тиску протягом часу, розраховуючи точну акустичну дозу, що впливає на барабанну перетинку. Ця інформація може передаватися по бездротовому каналу на єдину платформу моніторингу, дозволяючи фахівцям з охорони праці в реальному часі відстежувати накопичену дозу для кожного працівника і не допускати перевищення встановлених санітарних норм. Це знаменує собою перехід від оцінки гіпотетичного ризику до управління фактичним впливом. Навіть при точному вимірюванні дози шуму, що досягає барабанної перетинки, залишається питання індивідуальної вразливості слухової системи кожного працівника. Відповіддю на цей виклик стає впровадження біометричних методів оцінки, які дозволяють перейти від фізичних вимірювань акустичного середовища до об'єктивної оцінки її фізіологічного впливу на людину. Найбільш перспективним методом у цій галузі є моніторинг отоакустичної емісії (Otoacoustic Emission, OAE) [5]. OAE-це слабкі акустичні сигнали, що генеруються зовнішніми волосковими клітинами вушної раковини внутрішнього вуха у відповідь на звуковий стимул. Інтенсивний шумовий вплив викликає метаболічне виснаження цих клітин, що призводить до тимчасового зниження амплітуди OAE. Це зниження є об'єктивним індикатором тимчасового зсуву порогу чутності (Temporary Threshold Shift, TTS) – ключового провісника постійної втрати слуху. Сучасні дослідницькі прототипи ЗІЗ слуху інтегрують у вушний вкладиш мініатюрний звуковий зонд (динамік і мікрофон), який дозволяє проводити OAE-тестування прямо на робочому місці, наприклад, до і після робочої зміни. Порівняння результатів дозволяє кількісно оцінити ступінь втоми слухового аналізатора за день і виявити працівників з підвищеною вразливістю до шуму, що вимагають додаткових заходів захисту. Іншим напрямком є аналіз інших біометричних маркерів. Наприклад, результати досліджень свідчать про наявність кореляції між шумовим впливом і підвищенням рівня стресу, який може бути оцінений за змінами варіабельності серцевого ритму (Heart Rate Variability, HRV), що реєструються за допомогою сенсорів, вбудованих у навушники. Одночасно використання “розумних” засобів захисту органів слуху та систем персональної дозиметрії зумовлює

формування значних масивів даних, для оброблення яких необхідні сучасні цифрові інструменти. Ключову роль тут починають грати технології машинного навчання (Machine Learning, ML) [6]. Зібрані дані (рівень зовнішнього шуму, його спектральні характеристики, реальне загасання PAR, дані про пересування працівника, результати OAE - тестів) можуть бути використані для навчання предиктивних моделей. Такі моделі здатні, наприклад, прогнозувати реальний рівень захисту (PAR) для конкретного працівника, що використовує конкретну модель ЗІЗ, при виконанні певного виду робіт. Це дозволяє заздалегідь оцінити ризики і підібрати найбільш ефективний засіб захисту. Крім того, ML – алгоритми можуть виявляти в масивах даних неочевидні патерни і фактори, що впливають на ефективність ЗІЗ, наприклад, залежність загасання від певного типу рухів або від часу носіння пристрою. Ще однією передовою технологією є використання “цифрових двійників” (Digital Twins). Створюється детальна віртуальна модель будівельного майданчика, що включає джерела шуму і маршрути пересування працівників. Інтегруючи в цю модель дані про реальну ефективність ЗІЗ-ПШЗС, отримані за допомогою FAES, можна моделювати різні сценарії і оцінювати сукупний шумовий вплив на персонал, оптимізувати робочі графіки і розташування обладнання для мінімізації ризиків задовго до початку реальних робіт. Оцінка короткострокової ефективності ЗІЗ-ПШЗС важлива, але для повноцінного управління ризиками втрати слуху необхідні довгострокові, або лонгітюдні, дослідження. Їх мета-простежити за станом слуху групи працівників протягом декількох років і виявити кореляцію між фактичним шумовим впливом і динамікою аудіологічних показників. Методологія такого дослідження передбачає регулярний збір даних з декількох джерел: персональна дозиметрія шуму “під ЗІЗ” (in-ear dosimetry), періодичні польові тести на загасання (PAR), а також стандартні аудіометричні обстеження (тональна порогова аудіометрія). Потім зібрані дані аналізуються за допомогою складних статистичних методів, таких як моделі змішаних ефектів, які дозволяють враховувати як індивідуальні відмінності між працівниками, так і вплив різних факторів на робочому місці. Такі дослідження дозволяють відповісти на фундаментальні питання: яка реальна швидкість розвитку професійної приглухуватості при використанні різних типів ЗІЗ-ПШЗС. Чи існує безпечний поріг добової дози шуму, який з високою ймовірністю не призведе до втрати слуху в довгостроковій перспективі. Результати таких лонгітюдних досліджень є безцінним джерелом інформації для перегляду санітарних норм, вдосконалення програм збереження слуху та розробки більш ефективних превентивних стратегій.

Постановка проблеми

Незважаючи на розвиток сучасних засобів польового контролю, для будівельної галузі залишається недостатньо опрацьованою задача комплексного оцінювання ефективності засобів захисту органів слуху в реальних умовах експлуатації. Особливої актуальності набуває поєднання натурних даних про шумове навантаження, фактичного часу використання ЗІЗ-ПШЗС та комп’ютерного моделювання акустичної взаємодії в системі “джерело шуму – засіб захисту – слуховий канал працівника”, що необхідно для обґрунтованого прогнозування реального рівня захисту.

Методологія дослідження

Для досягнення поставленої мети використано комплексний підхід, що поєднує аналіз сучасних методів оцінювання ефективності засобів захисту слуху, польові експериментальні дослідження шумового навантаження на будівельних майданчиках та комп’ютерне моделювання акустичних характеристик протишумових засобів. Натурна частина ґрунтується на трирічних дослідженнях впливу шуму на будівельників в Одесі у 2018–2021 роках. Під час роботи будівельники носили шумомір MASTECH MS6701, який реєстрував рівні шуму з інтервалом в одну хвилину. Розрахункова частина передбачала визначення еквівалентного

рівня шуму за зміну при відсутності використання ЗІЗ-ПШЗС, а також оцінювання ефекту зниження шумового навантаження при їх застосуванні. Комп'ютерне моделювання виконувалося за допомогою інтерфейсу Pressure Acoustics, Boundary Element модуля Acoustics із використанням підходу HRTF, що дозволило зіставити результати чисельного аналізу з натурними вимірюваннями.

Для досягнення поставленої мети у роботі необхідно розв'язати такі завдання:

проаналізувати сучасні лабораторні, польові та цифрові підходи до оцінювання ефективності ЗІЗ-ПШЗС;

узагальнити результати тривалих натурних вимірювань шумового навантаження працівників будівельної галузі;

розробити та верифікувати комп'ютерну модель оцінювання фактичної ефективності ЗІЗ-ПШЗС на основі польових даних та акустичного моделювання.

Результати

Впродовж розвитку технологій FAES, REAT, OAE та TTS комп'ютерна модель ефективності ЗІЗ – ПШЗС. Результати досліджень порівняні з експериментальними, що зібрані у робітників, найнятих різними підрядниками на багатьох об'єктах “Укрбуд” Одеса, Україна, які брали участь в трирічному (2018 – 2021) дослідженні, в якому вивчався вплив шуму і погіршення слуху у будівельників-стажерів. Працівники відповідали на питання перед початком дослідження (базовий опитування), і потім до 3 разів при проведенні щорічних опитувань. У дослідженні брали участь оператори наступних будівельних машин та устаткування: пневматичний перфоратор, відбийний молоток, шліфувальна машина дискова, прес-ножиці комбіновані, лебідка електрична, машина дискова відризна, автонавантажувачі, \vibratori поверхневі, бадді з міксерами електричні, вібратори глибинні. Аналогічні дослідження проведені на об'єктах АМПУ Чорноморську 2017 році будівельники п'яти професій використовували ПШЗС частіше, ніж у 2018 році.

Заміри проводилися з жовтня 2018 до березня 2021. Під час роботи будівельники носили з собою записуючий пристрій, шумомір (MASTECH MS6701), яке реєструвало рівень шуму з інтервалом в 1 хвилину. Цей пристрій було відрегульовано для запису даних відповідно до певних налаштувань. Для обчислення еквівалентного рівня шуму, що впливав на працівників при не застосуванні ЗІЗ-ПШЗС, використовували результати щохвилинних вимірів шуму протягом зміни. Обчислення проводили за допомогою рівняння 1:

$$TW_{Ai} = 10 \cdot \log_{10} \left[\frac{\sum_{k=1}^{n_i} (10^{\frac{Li}{10}})}{480} \right], \quad (1)$$

- де k – номер однохвилинного інтервалу часу у зміні;
 Li – середньозмінний рівень змінного шуму з корекцією $A_{Leq\ average}$ для хвилинного інтервалу часу для респондента i , та n_i – номер однохвилинного періоду під час проведення вимірів.

Ефект зниження шумового навантаження на робітників, що використовують ЗІЗ-ПШЗС представлений рівнянням:

$$TW_{Ai} = 10 \cdot \log_{10} \left[\frac{\sum_{k=1}^{n_i h p} 10^{Li - Ha/10} + \sum_{k=1}^{n_i n h p} 10^{Li/10}}{480} \right], \quad (2)$$

- де k – однохвилинний інтервал ПШЗС;
 Li – еквівалентний рівень шуму впродовж 1 хвилини с А-корекцією;
 $n_i h p$ – вилин захисту робітника ЗІЗ-ПШЗС;
 Ha – ередне послаблення рівня шумут, а $n_i n h p$ – час простою ЗІЗ-ПШЗС.

Також були обчислені середні арифметичні і стандартні відхилення для значень відмінності (відповідних індивідуальних) середньозмінних еквівалентних рівнів шуму з і без ЗІЗ-ПШЗС: ($TW_A - TW_{Aprot}$ – prot, для одного й того ж виміру). Тобто визначили середні значення і стандартні відхилення ефективності захисту, у працівників різних професій, і у всіх разом.

За результатами польових досліджень на ділянцях встановлено, що середній рівень шуму становить вище за 80 і 85 дБА. Досліджено зменшення шуму на робочих місцях 44 робітників на 4 будівництвах: оператор шліфувальної машина дискової, оператор прес-ножиців комбінованих, оператор пневматичного перфоратора, оператор шліфувальної машини дискової. Ми вибрали тих робітників, що завжди носять ЗІЗ-ПШЗС. Але коли ми прийшли перевірити їх, 26 з 44 не носили ЗІЗ-ПШЗС. І ніхто з них не носив ПШЗС на будівництві. Результати експериментальних досліджень представлені в таблиці 1.

Таблиця 1: Експериментальні дослідження послаблення шуму у працівників при використанні ними ЗІЗ-ПШЗС (PAR), дБ.

Модель	NRR с корег.	Ліве вухо		Праве вухо		Обидва вуха	
		N вимірів		N вимірів		N вимірів	
“Max”	29	26	24,2	25	17,7	25	20,4
“Laser Lite”	31	11	22,4	9	25,6	9	17,6
“Howard Leight DISPENSER LS500”	27,3	7	23,3	5	17,0	5	18,9
“Neutron”	29,2	12	24,3	39	20,0	39	19,5

У цих робітників, що завжди використовують ПШЗС “Max”, “Max Lite”, “Laser Lite”, “MultiMax”, “Bilsom 303”, “Bilsom 304”, “Matrix Orange”, “Matrix Blue”, “Pilot”, “SmartFit”, “AirSoft”, “Quiet”, “Clarity 656”, “Fusion”, “QB1HYG”, “QB2HYG”, “QB3HYG”, “PerCap”, “Laser Trak”, “SmartFit Detectable”, “Fusion Detectable”, “Neutron”, “Howard Leight DISPENSER LS400”, “Howard Leight DISPENSER LS500”, що надані на час проведення досліджень. У деяких моделей зробили всього лише 1-2 виміру, але для порівняння всі результати згрупували в 4 групи: “Max” (26 вимірів), “Laser Lite” (11), “Howard Leight DISPENSER LS500” (7) і “Neutron” (12). В середньому, вкладиші Howard Leight найкраще зменшують шум у вухах.

Вплив частки часу використання ЗІЗ-ПШЗС на зниження впливу шуму можна описати математично, за допомогою рівняння 3, вважаючи що двократному зміні дози впливу шуму відповідає зміна рівня шуму на 3 дБ.

$$P_{eff} = 10 \cdot \log_{10} \left[\frac{100}{100 - \tau \times \left(1 - 10^{-\frac{N}{10}} \right)} \right], \quad (3)$$

де τ – час використання ПШЗС, %;

N – ступінь послаблення шуму за умов використання ЗІЗ-ПШЗС, дБ.

Нехай ЗІЗ-ПШЗС послаблюють шум на 20 дБ, як це вийшло у працівників, які брали участь в нашому дослідженні, і нехай загальна частка часу використання ЗІЗ-ПШЗС не перевищує 1/3.

Комп’ютерне моделювання ЗІЗ-ПШЗС здійснюється за допомогою інтерфейсу Pressure Acoustics, Boundary Element модуля Acoustics. Результати моделювання порівнюються з вимірними даними фактичного об’єкта та демонструють хорошу узгодженість. HRTF дає повний опис того, як голова та тулуб людини спотворюють падаючі звукові поля. HRTF є

важливим компонентом просторового слуху. HRTF включає як так звані моно-, так і бінауральні сигнали. Бінауральні сигнали включають міжвушні часові різниці (ITD) та міжвушні різниці рівнів (ILD), тоді як моно-вушні сигнали представляють спектральне спотворення звуку, ідентичне для обох вух [7]. HRTF визначається як рівень звукового тиску (SPL), виміряний біля барабанної перетинки (або входу у слуховий канал, як у цій моделі) відносно SPL за відсутності голови. Коли використовується віртуальний звук (або акустична віртуальна реальність), HRTF важливий для того, щоб випробуваний відчув віртуальну звукову сцену. HRTF можна виміряти, що може бути виснажливим завданням, або його можна змоделювати на основі сканування людини. Ця модель представляє останній підхід на відсканованій геометрії голови, наданій Інститутом слухових технологій та акустики (ІНТА) [8]. Сканування стосується реальної людини, риси обличчя якої були видалені, але всі деталі геометрії вуха були збережені. Вплив голови, тулуба, раковин, вушної раковини та вуха на посилення рівня тиску на барабанній перетинці обговорюється в [7].

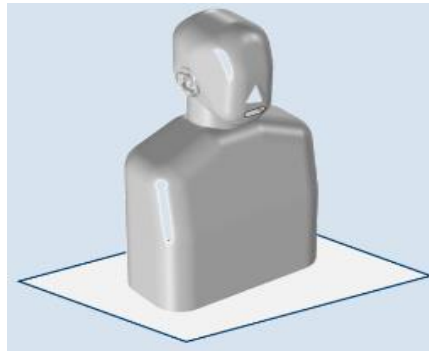


Рисунок 1: Визначення комп'ютерної моделі 3D – ПСШЗ

Симулятор голови та тулуба, або геометрія прототипа робітника-будівельника, – це загальна геометрія, що представляє основні характеристики людського тіла, що сприяють акустичній реакції тіла. Геометрія вуха базується на 3D-скануванні фактичної людської голови/вуха. Модель використовує інтерфейс фізики Pressure Acoustics, Boundary Elements для вивчення акустичного поля в області півпростору зовні манекена. У нижній частині прототипа робітника-будівельника а розташована нескінченна жорстка межа звуку. Її можна видалити для моделювання повнопросторової реакції. Слуховий канал представлений у моделі за допомогою умови імпедансу. Використовується вбудована модель фізіологічного імпедансу “Людське вухо без вушної раковини”. Результати дослідження моделювання падаючої хвилі представлені на рисунку 2.

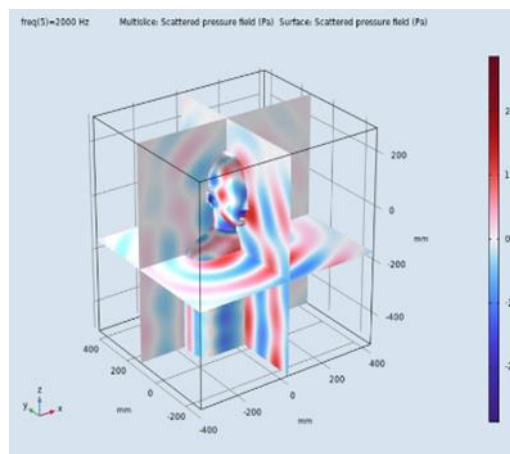


Рисунок 2: Моделювання падаючої хвилі

У цьому дослідженні ми розглядаємо реакцію прототипа робітника-будівельника, зануреного у фонове акустичне поле плоских хвиль. Цікаво спостерігати, як манекен починає створювати тінь в акустичному полі зі збільшенням частоти падаючих хвиль. При використанні нескінченної жорсткої межі звуку напрямком плоскої хвилі має бути в площині (у площині xy). В подальшому виконано моделювання передавальної функції, що пов'язана з головою (HRTF). Результати досліджень передавальної функції наведені на рисунку 3.

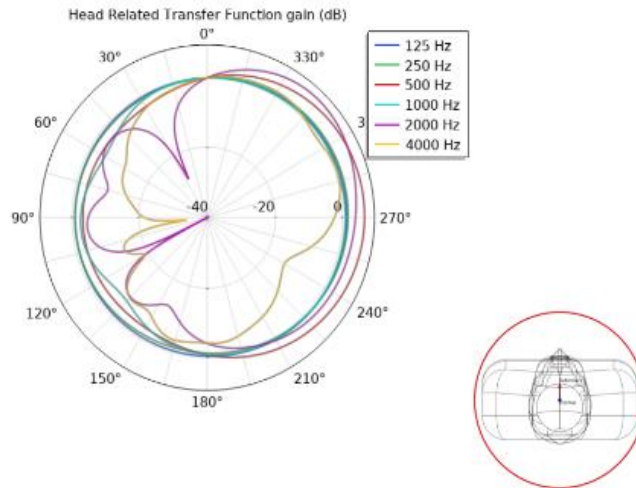


Рисунок 3: Дослідження передавальної функції ЗІЗ-ПШЗС прототипа робітника-будівельника

У цьому дослідженні ми встановлюємо швидкість на вході у слуховий канал, щоб обчислити рівень звукового тиску на колі радіусом 1 м навколо центру голови манекена. Реакція на цьому колі нормалізується до рівня звукового тиску на відстані 1 метра точно перед головою манекена. Цікаво відзначити, як HRTF починає демонструвати складніші закономірності зі збільшенням частоти. Саме тут довжина хвилі стає порівнянною з різними геометричними характеристиками [9, 10].

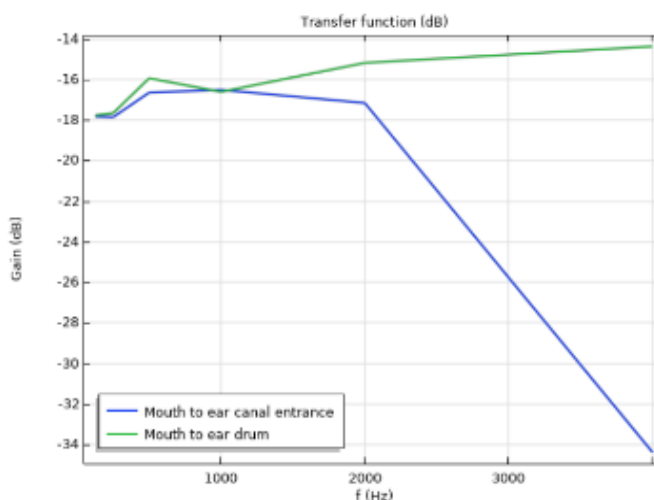


Рисунок 4 – Дослідження передавальної функції від рота до вуха

У цьому дослідженні ми встановлюємо швидкість на вході в рот, щоб обчислити рівень звукового тиску на вході в слуховий прохід та барабанну перетинку. Різниця визначає передавальну функцію. Деякі результати випробувань для порівняння представлені [8, 10].

Висновки

1. Проведений аналіз підтвердив, що традиційні лабораторні підходи до оцінювання ефективності засобів захисту органів слуху, засновані на усереднених показниках, не забезпечують повного уявлення про фактичний рівень захисту працівника в реальних виробничих умовах. Розвиток методологій у цій сфері свідчить про перехід від статичної оцінки до більш об'єктивного визначення реальної ефективності ЗІЗ органів слуху з урахуванням умов їх практичного використання.

2. Встановлено, що впровадження польових методів оцінювання, зокрема систем FAES на основі технології MIRE, стало важливим етапом у розвитку підходів до дослідження ефективності ЗІЗ органів слуху, оскільки дало змогу визначити фактичний рівень захисту, який працівник отримує безпосередньо у виробничому середовищі. Це підтверджує доцільність переходу від виключно лабораторних випробувань до динамічного, персоналізованого та дано-орієнтованого оцінювання.

3. Подальший розвиток методологій оцінювання ефективності ЗІЗ органів слуху доцільно пов'язувати з інтеграцією засобів безперервного моніторингу персонального загасання та фактичної шумової дози, а також із використанням біометричних датчиків і алгоритмів штучного інтелекту для оцінювання фізіологічних наслідків шумового впливу та прогнозування індивідуальних ризиків професійної приглухуватості. Реалізація таких підходів є основою для вдосконалення програм збереження слуху та підвищення ефективності профілактики шумозумовлених порушень у працівників.

Фінансування

Це дослідження не отримало конкретної фінансової підтримки.

Конкуруючі інтереси

Автори заявляють, що у них немає конкуруючих інтересів.

Список використаних джерел:

1. ANSI/ASA S12.6-2016. Methods for Measuring the Real-Ear Attenuation of Hearing Protectors. American National Standards Institute/Acoustical Society of America, 2016. URL: https://stacks.cdc.gov/view/cdc/210634/cdc_210634_DS1.pdf (дата звернення: 22.07.2025).
2. Voix J., Smith P., Berger E. Field-Microphone-in-Real-Ear (F-MIRE) Measurements. In: The Noise Manual, 6th ed. American Industrial Hygiene Association, 2018. URL: <https://www.aiha.org/education/marketplace/noise-manual-6th-edition> (дата звернення: 22.07.2025).
3. Viallet G., Sgard F., Laville F., & Boutin J. A finite element model to predict the sound attenuation of earplugs in an acoustical test fixture. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2014. Vol. 136(3). 1269–1280. DOI: <https://doi.org/10.1121/1.4890645>
4. Gauthier P.-A., Carillo K., & Doutres O. Reduction of the occlusion effect induced by earplugs using quasi-perfect absorption by critically coupled resonators. *Scientific Reports*, 2022. Vol. 12(1). 15494. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-19641-3>
5. OSHA. (n.d.). Hearing Conservation in Construction. Toolbox Talk. URL: <https://www.osha.gov/> (дата звернення: 22.07.2025).
6. Karandikar A. Modeling an Ear Canal's Acoustics to Optimize In-Ear Audio Products. *COMSOL Blog*, 2020. URL: <https://www.comsol.com/blogs/modeling-an-ear-canal-acoustics-to-optimize-in-ear-audio-products/> (дата звернення: 22.07.2025).

7. National Academy of Engineering. 7 Cost-Benefit Analysis for Noise Control. In *Technology for a Quieter America*, 2010. The National Academies Press. URL: <https://nap.nationalacademies.org/read/12928/chapter/9> (дата звернення: 22.07.2025).
8. Parklane Mechanical. A Parklane case study: Mitigating VRF noise at a high-rise condo, 2024. URL: <https://parklanemechanical.com/a-parklane-case-study-mitigating-vrf-noise-at-a-high-rise-condo> (дата звернення: 22.07.2025).
9. ISO 9613-2:1996. Acoustics. Attenuation of sound during propagation outdoors. Part 2: General method of calculation. URL: <https://www.iso.org/standard/2065.html> (дата звернення: 22.07.2025).
10. Arenas J. P., & Crocker M. J. Recent trends in porous sound-absorbing materials. *Sound & Vibration*, 2010 Vol. 44(7). P. 12-17. URL: https://www.researchgate.net/publication/272151761_Recent_Trends_in_Porous_Sound-Absorbing_Materials (дата звернення: 22.07.2025).

References

1. ANSI/ASA S12.6-2016. Methods for Measuring the Real-Ear Attenuation of Hearing Protectors. American National Standards Institute/Acoustical Society of America, 2016. URL: https://stacks.cdc.gov/view/cdc/210634/cdc_210634_DS1.pdf.
2. Voix J., Smith P., Berger E. Field-Microphone-in-Real-Ear (F-MIRE) Measurements. In: *The Noise Manual*, 6th ed. American Industrial Hygiene Association, 2018. URL: <https://www.aiha.org/education/marketplace/noise-manual-6th-edition>.
3. Viallet G., Sgard F., Laville F., & Boutin J. A finite element model to predict the sound attenuation of earplugs in an acoustical test fixture. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2014. Vol. 136(3). 1269–1280. DOI: <https://doi.org/10.1121/1.4890645>
4. Gauthier P.-A., Carillo K., & Doutres O. Reduction of the occlusion effect induced by earplugs using quasi-perfect absorption by critically coupled resonators. *Scientific Reports*, 2022. Vol. 12(1). 15494. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-19641-3>
5. OSHA. (n.d.). Hearing Conservation in Construction. Toolbox Talk. URL: <https://www.osha.gov/> (дата звернення: 22.07.2025).
6. Karandikar A. Modeling an Ear Canal's Acoustics to Optimize In-Ear Audio Products. *COMSOL Blog*, 2020. URL: <https://www.comsol.com/blogs/modeling-an-ear-canal-acoustics-to-optimize-in-ear-audio-products/>.
7. National Academy of Engineering. 7 Cost-Benefit Analysis for Noise Control. In *Technology for a Quieter America*, 2010. The National Academies Press. URL: <https://nap.nationalacademies.org/read/12928/chapter/9>.
8. Parklane Mechanical. A Parklane case study: Mitigating VRF noise at a high-rise condo, 2024. URL: <https://parklanemechanical.com/a-parklane-case-study-mitigating-vrf-noise-at-a-high-rise-condo>.
9. ISO 9613-2:1996. Acoustics. Attenuation of sound during propagation outdoors. Part 2: General method of calculation. URL: <https://www.iso.org/standard/2065.html>.
10. Arenas J. P., & Crocker M. J. Recent trends in porous sound-absorbing materials. *Sound & Vibration*, 2010 Vol. 44(7). P. 12-17. URL: https://www.researchgate.net/publication/272151761_Recent_Trends_in_Porous_Sound-Absorbing_Materials.

