

УДК 004.414.6:628.423.7

<https://doi.org/10.31474/1999-981X-2026-1-31-39>

А. В. Беспалова
О. І. Книш
О. П. Дашковська
О. Б. Горностай
Г.І. Романська

ДОСЛІДЖЕННЯ ШУМОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ ВИРОБНИЧИХ ДІЛЬНИЦЬ

Мета. Незважаючи на наявність потужних програмних комплексів та теоретичних методів, бракує систематизованого підходу до їх застосування саме для специфічних умов будівельних майданчиків з урахуванням транзйентного характеру шуму та вимог української нормативної бази. Таким чином, основним завданням даної роботи є проведення комплексного аналізу та систематизація сучасних методів і засобів комп'ютерного моделювання для проведення транзйентного акустичного аналізу закритих просторів будівельних майданчиків, з метою створення науково-методологічної основи для вирішення практичних прєктних задач щодо проєктування сучасних шумозахисних споруд локального типу.

Методика проведення досліджень. Детально розглянуто та порівняно основні чисельні та геометричні методи моделювання: метод скінченних елементів (FEM), метод граничних елементів (BEM) та методи трасування променів (Ray Tracing), а також перспективні гібридні підходи FEM-BEM.

Результати роботи. Проведено порівняльний огляд сучасного програмного забезпечення, надано рекомендації щодо їх вибору залежно від специфіки інженерної задачі. Особливу увагу приділено специфіці будівельних ділень як джерела імпульсного шуму. Проаналізовано вимоги ключового нормативного документу України — ДСН 3.3.6.037-99, що регламентує допустимі рівні шуму на робочих місцях.

Наукова новизна. Проведене комплексне дослідження дозволяє зробити ряд узагальнюючих висновків, що становлять основу для науково-методичного підходу до моделювання акустики закритих просторів будівельних майданчиків.

Ключові слова: акустичне моделювання, транзйентний аналіз, будівельний майданчик, метод скінченних елементів, метод граничних елементів, трасування променів, імпульсна характеристика, віброакустика, ДСН 3.3.6.037-99.

Вступ.

Класичні праці з архітектурної акустики, такі як роботи Г. Креймера, М. Р. Шредера, Л. Беранек, заклали основи розуміння процесів реверберації та поширення звуку в закритих просторах. Робота [1] є гарним прикладом узагальнення цих принципів, описуючи формулу Себіна, вплив поглинання та геометрії. Дослідження імпульсної характеристики (IR) як центрального поняття в аналізі приміщень детально висвітлено в роботах [2, 3, 4], де показано, що IR є повним акустичним “відбитком” приміщення. Методи вимірювання IR, такі як MLS (Maximum Length Sequence) та Sine Sweep, порівнюються у [5], що важливо для валідації результатів моделювання.

Застосування методу скінченних елементів (FEM) для моделювання акустики приміщень детально оглянуто в [6]. Автори підкреслюють його точність у

низькочастотному діапазоні для аналізу резонансних явищ та віброакустичної взаємодії. Однак, головним обмеженням залишається надзвичайно висока обчислювальна вартість для великих просторів. Метод граничних елементів (BEM) розглядається як альтернатива FEM, особливо для задач випромінювання у відкритий простір [7]. Сучасні досягнення в BEM, оглянуті в [8], спрямовані на створення “швидких” алгоритмів та покращення їх стабільності. Порівняння різних обчислювальних методів (FEM, dG-FEM, Ray Tracing) на прикладі COMSOL наведено в [9], де показано переваги та недоліки кожного з них. Фундаментальні відмінності між хвильовими та променевими методами глибоко проаналізовано в [10], що дає інженерам розуміння меж застосовності кожного підходу.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Відомо, що моделювання шуму будівельних майданчиків є більш прикладним напрямом. У роботі [11] представлено розробку моделі оцінки шуму в реальному часі на основі просторової інтерполяції даних з датчиків. Такі дослідження важливі для моніторингу, але не для прогнозування. Останні публікації [12, 13] все більше зміщують фокус на психоакустичне сприйняття будівельного шуму, досліджуючи не лише його рівень, а й ступінь роздратування. Українські вчені також роблять внесок у суміжну галузь віброакустичної діагностики будівельних конструкцій [14, 15, 16], що свідчить про наявність відповідної наукової школи.

Необхідно відзначити деякі недоліки у дослідженнях, а саме: попри велику кількість робіт, аналіз літератури виявляє певну прогалину; більшість досліджень з архітектурної акустики фокусуються на приміщеннях з високими акустичними вимогами (концертні зали, театри), а не на промислових об'єктах; роботи з моделювання будівельного шуму переважно розглядають його поширення на відкритій місцевості для оцінки впливу на житлову забудову. Систематизованих досліджень, що поєднували б транзйентний аналіз складного імпульсного шуму, специфіку закритих промислових приміщень будівельного типу та сучасні методи комп'ютерного моделювання (FEM/ВЕМ) з урахуванням національних стандартів України, практично немає. Дана стаття покликана заповнити цю прогалину.

Метою даної роботи є формування комплексного науково-методологічного підходу до комп'ютерного моделювання акустичних процесів у закритих просторах будівельних майданчиків, який базується на транзйентному аналізі та враховує специфіку джерел шуму та вимоги української нормативної бази. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

1. Систематизувати теоретичні основи поширення звуку та транзйентного аналізу, адаптувавши їх до умов промислових приміщень.

2. Провести глибокий порівняльний аналіз можливостей, переваг та недоліків сучасних методів комп'ютерного моделювання стосовно задач аналізу будівельного шуму.

3. Виконати аналіз функціоналу провідних програмних комплексів та розробити критерії їх вибору для вирішення конкретних інженерних задач.

4. Інтегрувати в методологію моделювання нормативні вимоги ДСН 3.3.6.037-99 як цільові критерії для оцінки акустичної безпеки робочих місць.

5. Сформулювати наукову новизну, практичну цінність та перспективи подальших досліджень на основі проведеного аналізу.

Виклад основного матеріалу. В основі будь-якого акустичного аналізу лежить розуміння хвильової природи звуку. Звук — це механічні коливання, що поширюються в пружному середовищі (в нашому випадку — в повітрі) у вигляді хвиль стиснення та розрідження. Математично цей процес описується системою рівнянь, що включає рівняння нерозривності (збереження маси), рівняння руху (другий закон Ньютона для елементарного об'єму середовища) та рівняння стану (зв'язок між тиском та густиною). Для малих коливань, що характерно для більшості акустичних задач, цю систему можна звести до єдиного лінійного хвильового рівняння:

$$\nabla^2 p(r, \tau) - \frac{1}{c_0^2} \cdot \frac{\partial^2 p(r, \tau)}{\partial \tau^2} = 0 \quad (1)$$

де $p(r, \tau)$ — акустичний тиск як функція просторових координат r та часу τ , c_0 — швидкість звуку в середовищі, а ∇^2 — оператор Лапласа, що описує просторові зміни. Це рівняння є фундаментальним, але його безпосереднє розв'язання для складних геометрій та граничних умов є надзвичайно складним. Тому в інженерній практиці використовують його похідні форми. Для аналізу реакції системи на гармонійний (синусоїдальний) вплив з кутовою частотою $\omega = 2\pi f$, застосовують представлення тиску у комплексній формі $P(r, \tau) = P(r)e^{i\omega\tau}$, що після підстановки в (1) приводить до

стаціонарного рівняння Гельмгольца:

$$\nabla^2 P(r) + k^2 P(r) = 0 \quad (2)$$

де $P(r)$ — комплексна амплітуда тиску, а $k = \omega/c_0$ — хвильове число, що показує, скільки довжин хвиль укладається на 2π метрах, f — лінійна частота. Рівняння Гельмгольца є еліптичним диференціальним рівнянням в частинних похідних і є відправною точкою для методів ВЕМ та частотного аналізу в FEM. Розв'язання хвильового рівняння неможливе без визначення граничних умов, які описують взаємодію звукової хвилі з поверхнями. В акустиці приміщень ключовою характеристикою поверхні є її акустичний імпеданс (Z), що визначається як відношення амплітуди звукового тиску до нормальної складової коливальної швидкості частинок на поверхні. На практиці частіше використовують коефіцієнт звукопоглинання (α), що показує, яка частка звукової енергії, що падає на поверхню, поглинається нею. α є безрозмірною величиною від 0 (повне відбиття) до 1 (повне поглинання) і залежить від частоти. Для пористих матеріалів (мінеральна вата, акустичний поролон) α зазвичай високий на середніх та високих частотах, а для щільних (бетон, метал) — низький. Фізика поглинання в пористих матеріалах полягає в перетворенні коливальної енергії частинок повітря в теплову за рахунок в'язкого тертя в складній системі пор. Існують також резонансні поглиначі (наприклад, панелі Гельмгольца), що ефективні у вузькому діапазоні низьких частот. Ці коефіцієнти є вихідними даними для моделювання і беруться з довідників або вимірюються експериментально в ревербераційних камерах.

Для опису нестационарних процесів, що є домінуючими на будмайданчику, частотний підхід (рівняння Гельмгольца) є недостатнім. Необхідно повертатися до часової області та рівняння (1). Центральним поняттям тут є імпульсна характеристика приміщення (IR), що позначається як $h(t)$. Це, по суті, є розв'язком хвильового рівняння для випадку, коли джерело звуку випромінює ідеально короткий та потужний імпульс (дельта-функцію Дірака).

Знання імпульсної характеристики є вичерпним, оскільки реакція системи $y(t)$ на будь-який довільний вхідний сигнал $x(t)$ (наприклад, запис удару молота) може бути знайдена через операцію згортки:

$$y(t) = x(t) \cdot h(t) = \int v(\tau) \cdot h(t - \tau) d\tau \quad (3)$$

Сама імпульсна характеристика має складну структуру. Вона починається з прямого звуку, за яким слідує серія дискретних ранніх відбиттів від найближчих поверхонь, що поступово переходять у щільний, експоненційно затухаючий ревербераційний “хвіст”. Аналіз цієї структури дозволяє визначити основні акустичні параметри приміщення, серед яких ключовим є час реверберації — інтервал часу, протягом якого рівень звукової енергії після вимкнення джерела зменшується на 60 дБ [2]. Для промислових приміщень великий час реверберації є негативним фактором, оскільки він призводить до накопичення звукової енергії та підвищення загального фонового рівня шуму. Для чисельного розв'язання рівнянь (1) та (2) в складних умовах будівельного майданчика застосовують три основні класи методів. Метод скінченних елементів (Finite Element Method, FEM), Метод граничних елементів (Boundary Element Method, BEM, Методи геометричної акустики (Ray Tracing). Сучасна тенденція полягає в об'єднанні методів. Наприклад, вібруючий верстат та прилеглу до нього зону повітря моделюють за допомогою FEM, а поширення звуку у дальню зону приміщення — за допомогою BEM. Це дозволяє поєднати точність FEM для джерела та ефективність BEM для великого простору [17].

Модель враховує не тільки повітря, але і вібрації конструкцій. Вони можуть впливати на рівень звуку. Аналізується не тільки гучність, але і частота звуку. Це допомагає зрозуміти, які звуки можуть бути шкідливими для слуху. Можна вивчити, як різні типи молотків та їх частота впливають на звук. Також можна оцінити, наскільки ефективні екрани та матеріали, які поглинають звук. Щоб дізнатися, як звук поширюється в кімнаті, ми виміряли його в десяти різних місцях. Ми перевірили

мікрофон, щоб вимірювання були точними. Проведено експеримент на великій моделі і перевірили, що передбачало спеціальне рівняння. Ми помітили, що звук стає тихішим, коли ми відходимо від того місця, звідки він походить. Це відбувається, як і повинно бути. Особливо цікаво було дивитися, як звук проходить через спеціальний отвір. Ми думали, що звук піде з одного приміщення в інше, і це підтвердилося. В одному приміщенні звук ставав тихіше, а в іншому — голосніше. Потім звук розсіювався. Ми вивчили, як звук стає тихішим, і зрозуміли, що це схоже на те, як працює рівняння для звуку. Але є деякі особливості, які можуть бути пов'язані з розмірами моделі і матеріалами стін. Потрібно вивчити їх детальніше. Встановлено, що якщо зробити отвір менше, то звук буде проходити повільніше з однієї кімнати в іншу. При цьому різниця в гучності між кімнатами буде більше. Це як ми і думали про звук. Експериментальні результати, отримані на масштабній моделі (рис. 1), демонструють значну кореляцію з прогнозами моделі дифузійного рівняння.



Рисунок 1. Масштабована 3 D модель експериментальної споруди

Ми зробили велику модель кімнати в масштабі 1:10 з фанери. Всередині вона покрита камінням, приклеєними до дерев'яних стін. Це потрібно, щоб світло і відбивалося від каменів і робило кімнату більш цікавою. На рис. 2 показані розміри кімнат. Перша кімната-основна, в ній стоїть маленька акустична система, яка створює звукові хвилі. Друга кімната з'єднана з

першою прозорою зоною і називається вторинною. Зона, яка з'єднує два приміщення, називається апертурою. Її розмір - 3×3 метри. В експериментах використовують моделі. Звукове джерело знаходиться в точці (-5, 2, 4, 1,3) метра. Він видає сигнал, який триває 25 секунд. Сигнал повторюється 10 разів. Мікрофон діаметром 25 міліметрів приймає звук. Під час експериментів вимірюють характеристики приміщення. Динаміки у формі додекаедра можуть видавати звуки до 32 кГц. Характеристики приміщення вимірюють з коефіцієнтом масштабу 1:8. В цьому випадку інформація про звук йде до 4 кГц. Каміні на стінах відбивають звук вище 1 кГц.

У даному дослідженні ми здійснюємо розподіл кімнат і визначаємо час згасання звуку в кожній з них. Цей час, який ми позначаємо як "природний", представлений символами T_1 та T_2 . Вимірювання часу проводиться в п'яти різних точках, що ілюструється на рисунку 2.

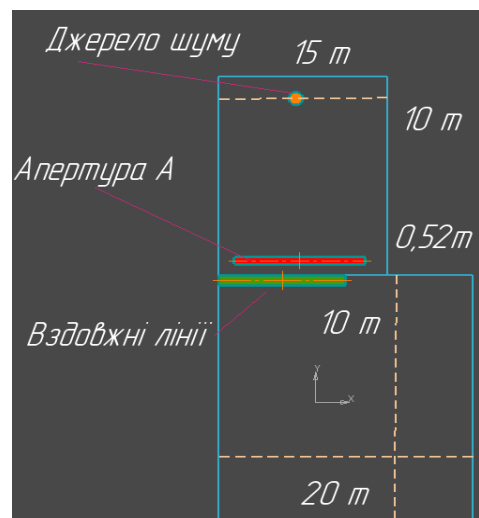


Рисунок 2. План комірок масштабованої експериментальної моделі

Для оцінки ефективності поглинання використовуємо рівняння Ейрінга. Аналізуючи середній час згасання звуку в кімнаті не видаляємо повітря або азот з простору, оскільки мета полягає в перевірці роботи рівняння дифузії, а не в моделюванні реальної кімнати. У рамках рівняння дифузії не розглядаємо вплив розсіювання повітря в кімнаті. Відомо, що матеріали стін поглинають звук, тому повітря не враховується в розрахунках. Загальні

усереднені коефіцієнти поглинання представлені в таблиці 1 та на рисунку 3. Порівнюючи результати розрахунків з даними попередніх досліджень [18] можна стверджувати про високу точність моделі її надійність, незважаючи на відсутність використання прямого звуку в експерименті.

Важливим кроком є порівняння отриманих результатів цієї моделі з іншими методами, що дозволить вдосконалити підходи і створити ефективні інструменти для архітекторів. Передбачається інтегрувати представлену модель з іншими процесами для розробки нових інструментів, що можуть бути корисними для архітекторів та інженерів.

Необхідно також дослідити поширення звуку на вулиці та в нетипових приміщеннях, що допоможе зрозуміти особливості відбиття звуку від стін та інших поверхонь. Для практичного застосування моделі слід розробити програмне забезпечення з автоматичного визначення параметрів з метою підвищення точності прогнозування результатів. Дослідження моделі також допоможе зрозуміти про зміну звуку в залежності від положення джерела та наявності робітників на робочій ділянці. Це призведе до створення інтелектуальних систем, за допомогою яких можна моніторити звукові умови. Важливо враховувати, що звук не зникає миттєво після припинення його джерела, і розуміння цього аспекту дозволить полегшити роботу в будівництві.

Інтегруючи модель з іншими факторами, такими як тепло і вентиляція можна отримати комплексне уявлення про будівельні процеси, що дозволить оцінити не лише звукові характеристики, але й інші параметри приміщень. Важливо також дослідити напрямки розсіювання звуку, особливо в приміщеннях з інтенсивним розсіюванням або при використанні спеціальних акустичних пристроїв. В подальшому слід приліплити увагу застосуванню дифузійної моделі в акустиці приміщень, що сприятиме перевірці її точності та інтерпретації результатів. Використання таких рекомендацій може перетворити дифузійну модель на корисний інструмент у будівництві та промисловості.

Одним із ключових аспектів дослідження є перехід рівня звукового тиску (SPL), що виникає внаслідок зміни розташування приймача з області, близької до отвору сполучної апертури, до суцільної стіни. Також важливим є перехід SPL, коли приймач переміщується через отвір з первинної кімнати до вторинної. На рисунку 4 представлено розподіл SPL за модифікованою моделлю дифузії. Шість різних кривих, що відображають SPL в кожній кімнаті, нанесені на обидві сторони апертури, як функція y по всій ширині кімнат у точці x .

У випадку рішення рівняння дифузії, що залежать від часу t , $q(r, t) = E_0 \cdot \delta(\tau)$, член $\delta(\tau)$ є імпульсом Дірака, а E_0 – постійна величина, та припускаючи всенаправлене джерело звуку з щільністю звукової енергії E_0 в момент $t = 0$ у всьому крихітному, але скінченному об'ємі V_s , зайнятому джерелом, розташованим у точці $r = r_l$.

Таблиця 1 – Коефіцієнт поглинання матеріалів, використаних у масштабній моделі, у різних октавних діапазонах (у повному масштабі).

	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	1.5–4 kHz
Первинна кімната	0.21	0.28	0.30	0.32	0.30
Вторинна кімната	0.14	0.16	0.17	0.19	0.17

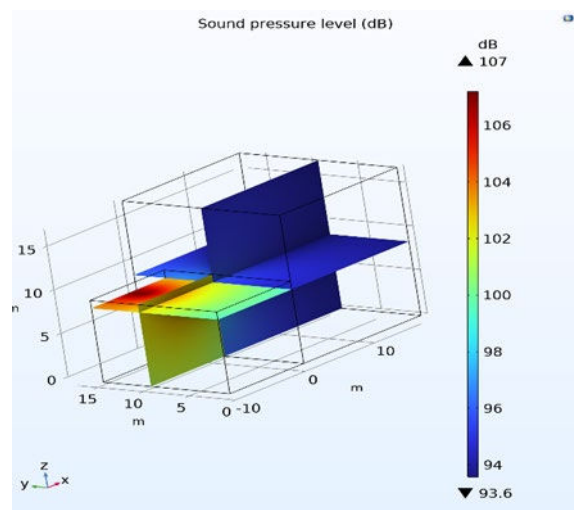


Рисунок 3. Розподіл SPL за моделлю дифузії в з'єднаних приміщеннях масштабної моделі, як показано на рис. 1.

Його енергетично-часова функція (*ETF*), зазвичай відома як енергетично-часова крива (*ETC*), може бути виражена як :

$$ETF = 10 \lg 10 \left(\frac{w(r, \tau) \rho c^2}{P_{ref}^2} \right) \quad (4)$$

де ρ — щільність повітря, c — швидкість звуку, а $P_{ref} = 2 \times 10^{-5}$ Па. $w(r, \tau)$ — імпульсна характеристика приміщення. Однак для аналізу затухання звукової енергії інтеграція Шредера імпульсної характеристики енергетичної кімнати дає наближене значення затухання звукової енергії в стаціонарному режимі (рис. 5).

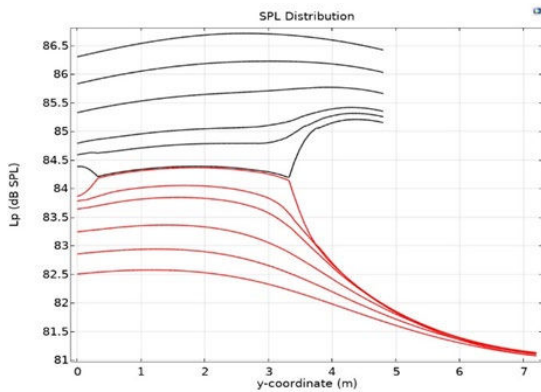


Рисунок 4. Розподіл рівня звукового тиску в стаціонарному стані, передбачений дифузійною моделлю для з'єднаних приміщень у масштабі, як показано на рис. 1.

$$d(r, t) = F(N, r, t)$$

$$d(r, \tau) \approx \frac{1}{N(r)} \int_{\tau}^{\infty} w(r, \tau) d\tau \quad (5)$$

$$N(r) = \int_0^{\infty} w(r, \tau) d\tau \quad (6)$$

Коли ми вимикаємо джерело звуку, енергія звуку починає зменшуватися. Це відбувається, коли звук стає слабшим. У рівнянні (5) є знак «наближення». Воно означає, що частина звуку не враховується. Але навіть якщо частина звуку не враховується, звук все одно стає слабшим. На рис. 5 показано, як змінюється звук. На ньому спостерігається, що звук стає слабшим, однак загальний нахил кривих залишається незмінним. На рис. 6 показані дві криві, які передбачають, як буде змінюватися енергія в кімнаті. Ці криві отримані за допомогою формул (4) і (5). Також на даному рисунку показані місця, де стоять прилади для

вимірювання енергії (R1 і R2). За допомогою спеціальної моделі, наведеної на рис. 6, можна простежити зміну енергії в приміщенні. Відповідні криві, як правило, є гладкими, а незначні їх коливання суттєво не впливають на результати. Показник ETF характеризує зміну енергії в кімнаті з часом, тобто відображає «швидкість» її зміни. Натомість стаціонарне загасання енергії відображає кількість енергії, що залишається в приміщенні. Обидва ці поняття об'єднуються під назвою «загасання Шредера». Якщо процес зменшення енергії відбувається з постійним нахилом, його можна описати за допомогою спеціальної формули, яка відображає закономірності цього процесу. Похідні від неї формули також характеризують процеси спадання.

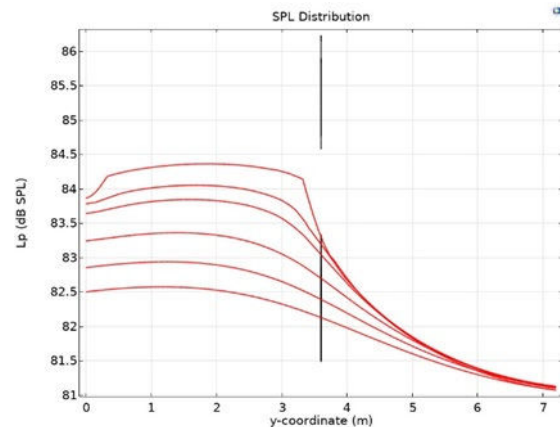


Рисунок 5. Порівняння нормалізованих функцій затухання Шредера, оцінених на основі вимірної імпульсної характеристики приміщення в масштабних моделях приміщень, з функціями затухання після видалення прямої складової звуку (перші 5 мс).

Більш важливим є те, що під час аналізу затухання енергії у сполучених приміщеннях, де часто спостерігаються характеристики з подвійним нахилом, різниця результатів може бути суттєвою, як показано на рис. 6. У точці приймача R1 звукова енергія демонструє саме таку — двоххилу — характеристику затухання. Альтернативний спосіб отримання бажаного затухання звукової енергії в межах дифузійної моделі передбачає задання сигналу вимкнення для члена $\delta(\tau)$, однак цей підхід є значно більш трудомістким.

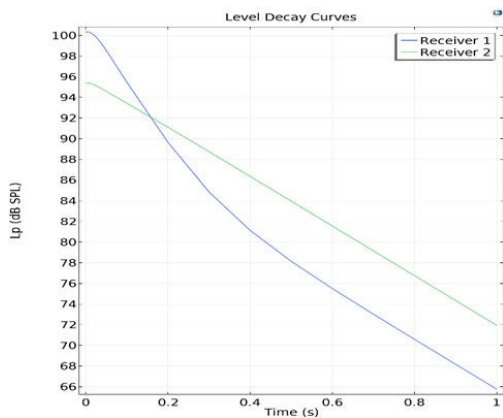


Рисунок 6. Дві криві енергії-часу та відповідні нормалізовані криві затухання Шредера, обчислені за формулою (6), передбачені на основі дифузійної моделі. Схема показує положення приймачів (R 1, R2) відповідно в модельованих з'єднаних приміщеннях.

Висновки. Проведене комплексне дослідження дозволяє зробити ряд узагальнюючих висновків, що є основою для науково-методичного підходу до моделювання акустики закритих просторів будівельних майданчиків. Адекватність транзйентного аналізу: специфічний характер шуму на будівельних майданчиках, що характеризується наявністю численних нестационарних та імпульсних джерел, робить застосування усереднених за часом методів оцінки недостатнім. Єдиним адекватним підходом, що дозволяє коректно оцінити пікові навантаження та реакцію акустичного середовища, є транзйентний аналіз, що базується на розв'язанні хвильового рівняння в часовій області або аналізі імпульсної характеристики. Обґрунтований вибір методу моделювання - не існує універсального методу моделювання, придатного для всіх задач. Вибір має базуватися на специфіці джерела шуму та частотному діапазоні. Для низькочастотного аналізу (< 250-500 Гц), де домінують хвильові ефекти та структурний шум від вібрації обладнання, єдиним достовірним методом є метод скінченних елементів (FEM) або гібридні схеми FEM-ВЕМ. Для середньо- та високочастотного аналізу акустики великих приміщень, оцінки ефективності звукопоглинальних матеріалів та розрахунку параметрів розбірливості, найбільш раціональним є використання

методів геометричної акустики (трасування променів). Максимальна ефективність та точність досягаються при комбінованому використанні програмного забезпечення. Детальний аналіз вібруючого джерела в інженерних пакетах (COMSOL, Ansys) може надавати вихідні дані (у вигляді віртуального джерела звуку) для швидкого моделювання поширення звуку у великому приміщенні за допомогою спеціалізованих пакетів (ODEON, EASE).

Список літератури

1. Acoustics of Enclosed Spaces: Architectural Acoustics. (n.d.). Arau Acustica. Retrieved from https://www.arauacustica.com/files/publicaciones_relacionados/pdf_esp_78.pdf
2. *Impulse Responses - REW*. (n.d.). Room EQ Wizard. URL: https://www.roomeqwizard.com/help/help_en-GB/html/impulseresponse.html
3. Hoffmann T. (2010). *Rays or Waves? Understanding the Strengths and Weaknesses of...* ICA. URL: https://www.acoustics.asn.au/conference_proceedings/ICA2010/cdrom-ISRA2010/Papers/O5a.pdf
4. *Hybrid Sound Modeling in Architectural Acoustics - Number Analytics*. (n.d.). Number Analytics. URL: <https://www.numberanalytics.com/blog/hybrid-sound-modeling-architectural-acoustics>
5. Albert G. Prinn (2023) *A Review of Finite Element Methods for Room Acoustics*. *Acoustics* 2023, 5(2), 367-395. MDPI. <https://doi.org/10.3390/acoustics5020022>
6. Sabatier L. (2023). *Acoustic Boundary Element Method in Workbench | LS-DYNA - Ansys*. Ansys. URL: <https://lsdyna.ansys.com/wp-content/uploads/2023/12/Acoustic-Boundary-Element-Method-in-Workbench-Laurent-Sabatier-Ansys.pdf>
7. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку (ДСН 3.3.6.037-99). 1999. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/va037282-99>
8. Marburg S., & Wu T. W. (Eds.). (2022). *Recent Advances in Acoustic Boundary Element Methods*. *Journal of Theoretical and Computational Acoustics*. DOI: [10.1142/S2591728522400023](https://doi.org/10.1142/S2591728522400023)
9. Іванов О. С. Дослідження акустичних характеристик приміщень : дипломна робота. – Київ, 2021. 75 с. URL: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/43961/1/Ivano_v_bakalavr.pdf
10. *BEM Methods For acoustic and vibroacoustic problems in LS-DYNA*. (2011). DYNALOOK. URL: https://www.dynalook.com/conferences/8th-european-ls-dyna-conference/session-23/Session23_Paper4.pdf
11. Lee S., et al. (2023). Development of a real-time noise estimation model for construction... *ScienceDirect. / Advanced Engineering Informatics*. Volume 58, October 2023, 102133. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2023.102133>
12. Sihar, I. Numerical modelling of transient low-frequency sound propagation ... (2022). Retrieved from

- https://research.tue.nl/files/205701438/20220701_Sihar_hf.pdf
13. Барабанов, С. С. Забезпечення безпеки експлуатації будівель і споруд з з урахуванням методу віброакустичного контролю (n.d.). CRUST. Retrieved from <https://crust.ust.edu.ua/items/c83f35dc-e9f5-43a5-8300-e55ce296b020/full>
 14. Шулдан Л. О., Штендера А. Ю. (2015). Соціальні передумови проектування акустично-рекреаційних осередків великого міста. Сучасні проблеми архітектури та містобудування. - 2015. - Вип. 40. - С. 321-325. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Spam_2015_40_47.
 15. Шевченко, Ю. С. (2014). Mathematical model of traffic noise. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4(4(70)), 47–51. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.26293>
 16. ДБН В.1.1-31:2013 Захист територій, будинків і споруд від шуму. 2013. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=56317
 17. Du J., & Liu Y. (2025). A fast fully coupled FEM/BEM method for structural-acoustic *ScienceDirect*. DOI: 10.1016/j.enganabound.2025.106261
 18. Bogatyrev, B. P., Dzjadzio, A. M., & Simonovič, M. J. (1973). Bor'ba s shumom na zernopererabatyvayushchikh predpriyatiyakh [Fighting noise at grain processing enterprises]. Kolos.
 7. Verkhovna Rada Ukrainy. (1999). *Sanitarni normy vyrobnychoho shumy, ultrazvuku ta infrazvuku (DSN 3.3.6.037-99)*. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/va037282-99>
 8. Marburg S., & Wu T. W. (Eds.). (2022). Recent Advances in Acoustic Boundary Element Methods. *Journal of Theoretical and Computational Acoustics*. URL: <https://www.worldscientific.com/doi/pdf/10.1142/S2591728522400023>
 9. Ivanov, O. S. (2021). *Research of acoustic characteristics of rooms* (Bachelor's thesis). Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute. URL: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/43961/1/Ivanov_bakalavr.pdf [in Ukrainian].
 10. *BEM Methods For acoustic and vibroacoustic problems in LS-DYNA*. (2011). DYNALOOK. URL: https://www.dynalook.com/conferences/8th-european-ls-dyna-conference/session-23/Session23_Paper4.pdf
 11. Lee S., et al. (2023). Development of a real-time noise estimation model for construction... *ScienceDirect*. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474034623002616>
 12. Sihar, I. Numerical modelling of transient low-frequency sound propagation ... (2022). URL: https://research.tue.nl/files/205701438/20220701_Sihar_hf.pdf.
 13. Barabanov, S. S. Zabezpechennia bezpeky ekspluatatsii budivel i sporud z z urakhuvanniam metodu vibroakustychnoho kontroliu (n.d.). [in Ukrainian]. CRUST URL: <https://crust.ust.edu.ua/items/c83f35dc-e9f5-43a5-8300-e55ce296b020/full>

References

1. Acoustics of Enclosed Spaces: Architectural Acoustics. (n.d.). Arau Acustica. URL: https://www.arauacustica.com/files/publicaciones_rela_cionados/pdf_esp_78.pdf
2. *Impulse Responses - REW*. (n.d.). Room EQ Wizard. URL: https://www.roomeqwizard.com/help/help_engB/html/impulseresponse.html
3. Hoffmann T. (2010). *Rays or Waves? Understanding the Strengths and Weaknesses of...* ICA. URL: https://www.acoustics.asn.au/conference_proceedings/ICA2010/cdrom-ISRA2010/Papers/O5a.pdf
4. *Hybrid Sound Modeling in Architectural Acoustics - Number Analytics*. (n.d.). Number Analytics. URL: <https://www.numberanalytics.com/blog/hybrid-sound-modeling-architectural-acoustics>
5. *A Review of Finite Element Methods for Room Acoustics - MDPI*. (2023). MDPI. URL: <https://www.mdpi.com/2624-599X/5/2/22>
6. Sabatier L. (2023). *Acoustic Boundary Element Method in Workbench | LS-DYNA - Ansys*. Ansys. URL: <https://lstdyna.ansys.com/wp-content/uploads/2023/12/Acoustic-Boundary-Element-Method-in-Workbench-Laurent-Sabatier-Ansys.pdf>
14. Shuldan L. O., Shtendera A. Yu. (2015). Sotsialni peredumovy proektuvannia akustychno-rekreasiinykh oseredkiv velykoho mista. Suchasni problemy arkhitektury ta mistobuduvannia. - Vyp. 40. - S. 321-325. [in Ukrainian]. - URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Spam_2015_40_47.
15. Shevchenko, Yu. S. (2014). Mathematical model of traffic noise. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4(4(70)), 47–51. [in Ukrainian]. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.26293>.
16. Ministry for Communities and Territories Development of Ukraine. (2013). *DBN V.1.1-31:2013 Zakhyst terytorii, budynkiv i sporud vid shumy*. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=56317
17. Du J., & Liu Y. (2025). A fast fully coupled FEM/BEM method for structural-acoustic... *ScienceDirect*. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0955799725001493>
18. Bogatyrev, B. P., Dzjadzio, A. M., & Simonovič, M. J. (1973). Bor'ba s shumom na zernopererabatyvayushchikh predpriyatiyakh. [Fighting noise at grain processing enterprises]. Kolos.

Беспалова Алла Вікторівна, д-р.техн. наук, професор, Одеська державна академія будівництва та архітектури, вул. Дідріхсона, 4, Одеса, Україна, 65029
E-mail: bespalova.a.v.2015@gmail.com
ORCID: 0000-0003-3713-0610

Книш Олексій Ігоревич, канд. техн. наук, доцент, Одеська державна академія будівництва та архітектури, вул. Дідріхсона, 4, Одеса, Україна, 65029

E-mail: corttas72@outlook.com

ORCID: 0000-0002-3449-4112

Дашковська Ольга Петрівна, канд. техн. наук, доцент, Одеська державна академія будівництва та архітектури, вул. Дідріхсона, 4, Одеса, Україна, 65029

E-mail: dop.od@ukr.net

ORCID: 0000-0002-9980-023X

Горностай Оріслава Богданівна, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри промислової безпеки та охорони праці, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, вул. Клепарівська, 35, м. Львів, 79007, Україна

<https://orcid.org/0000-0002-6863-6772>

Романська Галина Ігорівна, викладач кафедри промислової безпеки та охорони праці, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, вул. Клепарівська, 35, м. Львів, 79007, Україна

<https://orcid.org/0009-0003-7199-7282>

RESEARCH ON NOISE LOAD IN PRODUCTION AREAS

Problem statement. *Despite the availability of powerful software packages and theoretical methods, there is a lack of a systematic approach to their application specifically for the specific conditions of construction sites, taking into account the transient nature of noise and the requirements of the Ukrainian regulatory framework. Thus, the main task of this work is to conduct a comprehensive analysis and systematize modern methods and tools of computer modeling for conducting transient acoustic analysis of closed spaces of construction sites, in order to create a scientific and methodological basis for solving practical project tasks related to the design of modern local-type noise protection structures.*

Research methodology. *The main numerical and geometric modeling methods are considered in detail and compared: the finite element method (FEM), the boundary element method (BEM) and ray tracing methods, as well as promising hybrid FEM-BEM approaches.*

Results of the work. *A comparative review of modern software is conducted, recommendations are given for their selection depending on the specifics of the engineering problem. Particular attention is paid to the specifics of construction sites as sources of impulse noise. The requirements of the key regulatory document of Ukraine — SDS 3.3.6.037-99, which regulates permissible noise levels at workplaces, are analyzed.*

Scientific novelty. *The conducted comprehensive study allows us to draw a number of generalizing conclusions that form the basis for a scientific and methodological approach to modeling the acoustics of closed spaces of construction sites.*

Keywords: *acoustic modeling, transient analysis, construction site, finite element method, boundary element method, ray tracing, impulse response, vibroacoustics, SDS 3.3.6.037-99.*

Bespalova Alla, Doctor of Technical Sciences, Professor, Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture, 4 Didrichson St., Odesa, Ukraine, 65029

E-mail: bespalova.a.v.2015@gmail.com

ORCID: 0000-0003-3713-0610

Knysh Oleksiy, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture, 4 Didrichson St., Odesa, Ukraine, 65029

E-mail: corttas72@outlook.com

ORCID: 0000-0002-3449-4112

Dashkovska Olga, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture, 4 Didrichson St., Odesa, Ukraine, 65029

E-mail: dop.od@ukr.net

ORCID: 0000-0002-9980-023X

Hornostai Oryslava, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Industrial Safety and Occupational Health, Lviv State University of Life Safety, 35 Kleparivska St., Lviv, 79007, Ukraine

<https://orcid.org/0000-0002-6863-6772>

Romanska Halyna, Lecturer at the Department of Industrial Safety and Occupational Health, Lviv State University of Life Safety, 35 Kleparivska St., Lviv, 79007, Ukraine

<https://orcid.org/0009-0003-7199-7282>