

А. О. Бричанський; О. В. Христич, канд. техн. наук, доц.

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗВУКОІЗОЛЯЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ І ЗАЛЕЖНОСТЕЙ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

У статті розглянуто принципи роботи та ефективність резонансних звукопоглиначів, які застосовуються для зменшення часу реверберації у приміщеннях. Наведено класифікацію звукопоглинальних матеріалів за їхнім механізмом дії, зокрема пористих, мембранних і резонансних систем. Особливу увагу приділено аналізу акустичних властивостей матеріалів залежно від їхньої мікроструктури, відкритої чи закритої пористості, а також впливу цих характеристик на ефективність поглинання звукових хвиль у різних частотних діапазонах. Окремо розглянуто класичні та сучасні феноменологічні моделі акустичного поглинання. Узагальнено результати досліджень, що підтверджують взаємозв'язок між структурними характеристиками матеріалу, його щільністю та здатністю до звукопоглинання. Методом регресійного аналізу визначено регресійні залежності коефіцієнтів звукопоглинання для різних будівельних матеріалів (плит з ніздрюватого бетону та акустичного фіброліту) від частоти звукових хвиль, які можуть бути використані під час розробки методики інженерних розрахунків параметрів звукоізоляційних будівельних матеріалів. Побудовано графічну інтерпретацію залежностей коефіцієнтів звукопоглинання для різних будівельних матеріалів від частоти звукових хвиль, яка дозволяє наочно проілюструвати ці залежності та показати збіжність теоретичних результатів з фактичними. Встановлено, що коефіцієнт звукопоглинання плит з ніздрюватого бетону за збільшення частоти звукових хвиль зростає за гіперболічно-експоненціальною залежністю, а коефіцієнт звукопоглинання акустичного фіброліту за збільшення частоти звукових хвиль зростає за логарифмічною залежністю. При цьому плити з ніздрюватого бетону мають кращі звукоізоляційні властивості ніж акустичний фіброліт на усьому досліджуваному діапазоні частот звукових хвиль 125–4000 Гц.

Ключові слова: акустика будівель, резонансні звукопоглиначі, пористі матеріали, звукоізоляційні властивості, будівельні матеріали, математичне моделювання, регресійний аналіз, регресійна залежність.

Вступ

Акустичний комфорт у сучасних будівлях є однією з ключових складових якості архітектурного середовища. Поряд із забезпеченням енергоефективності, пожежної безпеки та надійності конструкцій, питання регулювання шуму та створення сприятливих акустичних умов набувають особливої актуальності. У громадських будівлях, таких як навчальні заклади, театри, конференц-зали та музичні студії, акустичні характеристики визначають ефективність функціонування приміщення за його основним призначенням. Для житлових будинків рівень акустичного захисту безпосередньо впливає на комфорт проживання, психологічний стан мешканців та їхню продуктивність [1 – 3].

Одним із головних параметрів, що характеризує акустичні умови приміщення, є час реверберації – проміжок часу, протягом якого рівень звукового тиску зменшується на 60 дБ після припинення роботи джерела звуку. Його тривалість залежить від об'єму приміщення, матеріалів оздоблення, наявності звукопоглинаючих поверхонь та геометрії простору. Надмірно великий час реверберації призводить до погіршення розбірливості мовлення та спотворення звукової інформації, тоді як занадто малий – робить приміщення «акустично сухим», що також негативно впливає на сприйняття. Тому основним завданням акустичного проектування є досягнення оптимального часу реверберації для конкретного типу будівлі [4 – 6].

Для регулювання цього показника застосовуються різні види звукопоглинаючих матеріалів і конструкцій: пористі, мембранні та резонансні. Серед них особливе місце

посідають резонансні поглиначі, принцип дії яких базується на поглинанні акустичної енергії внаслідок коливань повітря у вузьких отворах або камерах. Вони найбільш ефективні у вузьких діапазонах частот, що дозволяє цілеспрямовано коригувати акустичні параметри приміщень. Поєднання резонансних поглиначів із пористими матеріалами забезпечує комплексне регулювання акустики у широкому діапазоні частот [7–9].

Постановка проблеми

Дослідження резонансних поглиначів і будівельних матеріалів у контексті їхнього впливу на акустичні властивості будівельних конструкцій має важливе наукове та практичне значення. Воно спрямоване на оптимізацію архітектурно-будівельних рішень, підвищення комфорту перебування у приміщеннях, а також забезпечення відповідності сучасним вимогам енергоефективності й сталого розвитку. Тому дослідження звукоізоляційних властивостей і залежностей будівельних матеріалів є актуальною науково-технічною задачею.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Резонансні звукопоглиначі застосовуються з метою зменшення часу реверберації у приміщеннях, тобто часу затухання акустичної енергії після припинення дії первинного джерела звуку. Даний процес пов'язаний із багаторазовими відбиттями звукових хвиль від огорожувальних конструкцій та внутрішніх поверхонь приміщення. Час реверберації є однією з основних характеристик акустичних властивостей приміщення та залежить від його геометричних параметрів, об'ємно-планувальних рішень, типу та кількості звукопоглинальних матеріалів, а також від діапазону частот, що розглядається [1].

Резонансні поглиначі мають специфічну конструкцію, яка забезпечує селективне поглинання звукової енергії у вузькому діапазоні частот. Як правило, вони функціонують за рахунок взаємодії коливальних процесів у повітряних порожнинах або перфорованих елементах з масивом матеріалу, що має пружні властивості. Це дозволяє ефективно знижувати інтенсивність звукових хвиль на тих частотах, де інші типи звукопоглиначів (наприклад, пористі чи волокнисті) демонструють меншу ефективність. Завдяки цьому резонансні системи широко застосовуються у спеціалізованих приміщеннях, зокрема в концертних залах, студіях звукозапису, лекційних аудиторіях, кінотеатрах та інших об'єктах, де якість акустичного середовища має суттєве значення [2].

Загальна класифікація звукопоглинальних матеріалів і конструкцій за принципом дії передбачає поділ на кілька основних груп: пористі (волокнисті й піністі), мембранні (плівкові) та резонансні. Кожен із цих різновидів характеризується власним механізмом зменшення енергії звукових хвиль. Схематична класифікація звукопоглиначів за принципом дії наведена на рис. 1 [2].

Таким чином, використання резонансних поглиначів дозволяє не лише регулювати акустичні параметри приміщень, але й забезпечувати оптимальні умови для сприйняття звуку, що особливо важливо у випадках, коли необхідна висока якість акустичного середовища.

Звукоізоляційні матеріали, що монтуються із зазором від огорожувальної конструкції, відзначаються вищою ефективністю поглинання акустичних хвиль. Така властивість підтверджується численними експериментальними та теоретичними дослідженнями, які вказують на значне зменшення енергії відбитих звукових хвиль за рахунок наявності додаткового повітряного проміжку [2 – 4].

Акустична ефективність конструкцій з одним жорстким шаром безпосередньо залежить від таких параметрів, як густина матеріалу, його згинальна жорсткість, частота звукових коливань, а також наявність можливих дефектів, зокрема відкритих швів. Згинальна

жорсткість визначається типом матеріалу (наприклад, бетон характеризується значно вищою жорсткістю на вигин, ніж деревина) та товщиною шару.

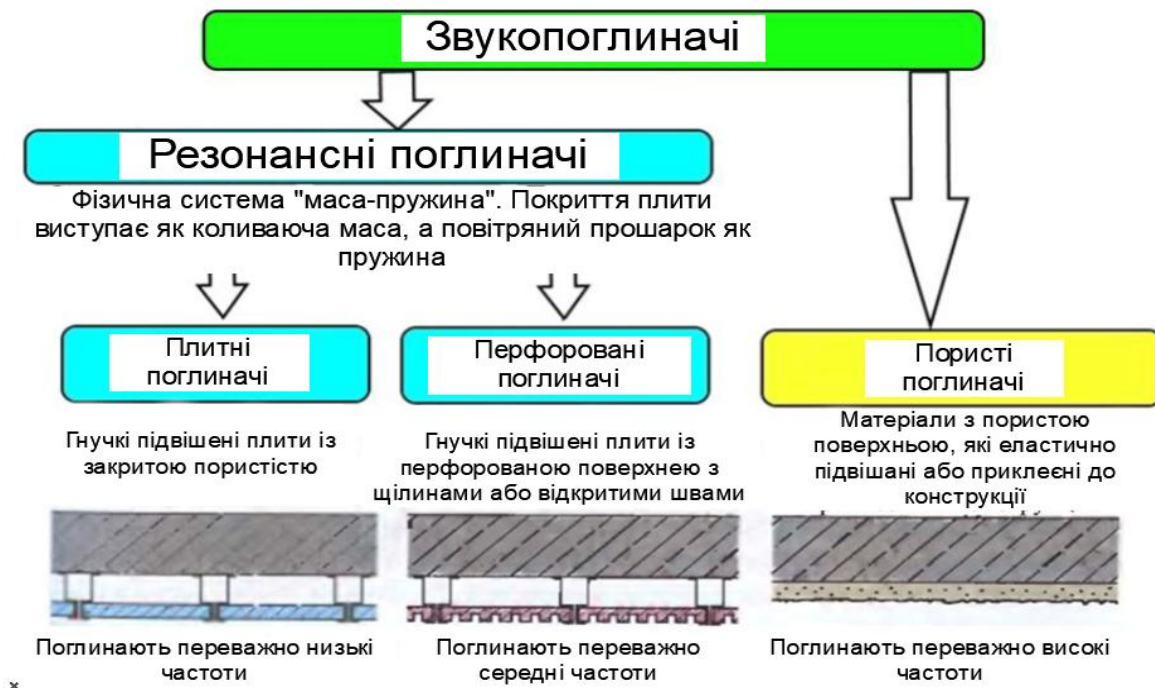


Рис. 1. Схематична класифікація звукопоглиначів за принципом дії

Властивості звукопоглинання матеріалів формуються залежно від типу пор на їхній поверхні та характеру внутрішньої пористої структури. Ефективне поглинання можливе лише у випадку високої відкритої пористості [5]. Закритопористі теплоізоляційні матеріали, такі як пінополістирол чи пінополіуретан, практично не здатні до акустичного поглинання. Згідно з матеріалами публікації [6], ефективність відкритих пор забезпечується лише за умови їхньої співмірності з довжиною акустичної хвилі. У таких випадках хвилі, проникаючи всередину матеріалу, втрачають енергію внаслідок багаторазових зіткнень із стінками пор та повітрям, що знаходиться у них. Це пояснює той факт, що короткі хвилі високочастотного діапазону поглинаються значно краще, ніж довгі низькочастотні та інфразвукові коливання [6].

У класичних феноменологічних моделях акустичного поглинання насамперед визначаються основні параметри (наприклад, питомий опір потоку), а вже на їх основі виводяться рівняння поширення звуку. Однією з найвідоміших абстрактних моделей є модель порового простору Релея, що розглядає систему капілярів як ідеально орієнтовані циліндри [5]. Хоча ця модель підтверджується експериментально, вона має істотний недолік – реальні пори рідко мають форму циліндричних каналів [7].

Подальший розвиток теорії здійснив К. Аттенборо, який запропонував низку моделей, що встановлюють взаємозв'язок між характеристиками хвиль різного діапазону та структурою порового простору [8]. Зокрема, він створив моделі звукопоглинаючих властивостей зернистих матеріалів та обчислив акустичний імпеданс ґрунтів, вкритих рослинним покривом, увівши поняття «зерновий фактор форми» [7 – 9].

Важливий внесок у розвиток моделей зробили Д. Л. Джонсон зі співавторами [5], які створили фундаментальну модель для жорстких пористих середовищ; М. Р. Стінсон і Й. Шампу [10], що досліджували акустичне поширення в матеріалах з порами неоднорідного поперечного перерізу; а також Д. Ф. Аллард [11], котрий розробив узагальнену концепцію визначення акустичних параметрів з урахуванням геометрії мікроструктури. Додатково, К. В. Хорошенков і М. Д. Свіфт [12] запропонували модель прогнозування характеристик

пористих зернистих середовищ на основі ймовірнісного розподілу розмірів пор. Проте всі ці моделі потребують точних експериментальних вимірювань та вирішення складних рівнянь.

З огляду на потреби цивільного будівництва, доцільним є використання більш спрощених моделей, які не потребують значних обчислювальних ресурсів та детальних акустичних параметрів. Наприклад, N. Neithalath із колегами [13] застосували модель пористого бетону, поєднану з методом геометричного спрощення, розробленим Т. J. Lu та ін. [2]. Ця модель виявилася адекватною завдяки використанню теорії мікроперфорованої звукопоглинаючої панелі D. Y. Маа [14], що враховує повітряні порожнини однакової форми й розмірів. У ній акустичний імпеданс пористого бетону визначається на основі вимірювань розмірів пор без необхідності додаткових акустичних досліджень [15 – 17].

Згідно з дослідженнями, підвищення здатності до звукопоглинання досягається, зокрема, зменшенням щільності матеріалу. У будівельній практиці широкого поширення набули легкі бетони зі щільністю від 200 до 1800 кг/м³, які одночасно забезпечують достатні теплоізоляційні характеристики. Для їх виготовлення застосовують пористі заповнювачі природного чи штучного походження фракцією 20 – 40 мм, рідше – дрібні наповнювачі. Одним із перевірених методів зниження щільності без втрати міцності є використання композиційних в'язучих [18].

Попри те, що легкі бетони характеризуються нижчою морозостійкістю через високу пористість, вони активно застосовуються для зовнішніх стінових конструкцій [18]. Морозостійкість можна підвищити за рахунок використання керамзиту та інших техногенних заповнювачів із низьким водопоглинанням або завдяки поризації цементного каменю [19]. Також ефективним є введення гідрофобізуючих добавок.

У матеріалах статей [20 – 22] наведено фізико-механічні властивості ніздрюватих бетонів. В роботі [23] наведені класифікація та технічні характеристики сучасних теплоізоляційних та акустичних матеріалів, зокрема значення коефіцієнта звукопоглинання для різних будівельних матеріалів та частот звукових хвиль.

Однак конкретних математичних залежностей коефіцієнтів звукопоглинання для різних будівельних матеріалів від частоти звукових хвиль, авторами не виявлено.

Мета і завдання статті

Метою цієї статті є дослідження звукоізоляційних властивостей і залежностей будівельних матеріалів, результати якого можуть бути використані під час розробки методики інженерних розрахунків параметрів звукоізоляційних будівельних матеріалів.

Методи і матеріали

Під час дослідження звукоізоляційних властивостей і залежностей будівельних матеріалів використано такі методи: аналіз літературних джерел, регресійний аналіз результатів однофакторних експериментів та інших парних залежностей, комп'ютерне моделювання.

Результати досліджень

У таблиці 1 показані значення коефіцієнта звукопоглинання для різних будівельних матеріалів та частот звукових хвиль [23].

Таблиця 1

Значення коефіцієнта звукопоглинання для різних будівельних матеріалів та частот звукових хвиль [23]

Види будівельних матеріалів	Коефіцієнт звукопоглинання при частоті звукових хвиль, Гц				
	125	500	1000	2000	4000
Плити з ніздрюватого бетону	0,08	0,36	0,62	0,77	0,76
Акустичний фіброліт	0,06	0,25	0,38	0,58	0,63

Регресія проводилась на основі лінеаризувальних перетворень, що дозволяють звести

нелінійну залежність до лінійної. Визначення коефіцієнтів рівнянь регресії здійснювалась методом найменших квадратів [24] за допомогою розробленої комп'ютерної програми "RegAnaliz", яка захищена свідоцтвом про реєстрацію авторського права на твір [25] і детально описана в роботах [26, 27].

Програма "RegAnaliz" дозволяє проводити регресійний аналіз результатів однофакторних експериментів та інших парних залежностей із вибором кращого виду функції із шістнадцяти найпоширеніших варіантів за критерієм максимального коефіцієнту кореляції зі збереженням результатів в форматі MS Excel та Bitmap.

Результати регресійного аналізу наведені в таблиці 2, де сірим кольором позначено комірки з видом регресії з максимальним значенням коефіцієнта кореляції R .

Отже, за результатами регресійного аналізу на основі даних таблиці 1, як найбільш адекватні, остаточно прийнято такі регресійні залежності:

$$\alpha_{\text{ПНБ}} = 0,7991e^{-292,7/f}; \quad (1)$$

$$\alpha_{\text{АФ}} = 0,1745 \ln f - 0,8011, \quad (2)$$

де $\alpha_{\text{ПНБ}}$, $\alpha_{\text{АФ}}$ – коефіцієнти звукопоглинання плит з ніздрюватого бетону та акустичного фіброліту, відповідно; f – частота звукових хвиль, Гц.

Таблиця 2

Результати регресійного аналізу залежностей коефіцієнтів звукопоглинання для різних будівельних матеріалів від частоти звукових хвиль

№	Вид регресії	Коефіцієнт кореляції R		№	Вид регресії	Коефіцієнт кореляції R	
		$\alpha_{\text{ПНБ}} = f(f)$	$\alpha_{\text{АФ}} = f(f)$			$\alpha_{\text{ПНБ}} = f(f)$	$\alpha_{\text{АФ}} = f(f)$
1	$y = a + bx$	0,78500	0,88574	9	$y = ax^b$	0,93760	0,96784
2	$y = 1 / (a + bx)$	0,57578	0,60431	10	$y = a + b \cdot \lg x$	0,97113	0,98795
3	$y = a + b / x$	0,92535	0,87383	11	$y = a + b \cdot \ln x$	0,97114	0,98796
4	$y = x / (a + bx)$	0,97239	0,98550	12	$y = a / (b + x)$	0,57578	0,60431
5	$y = ab^x$	0,68108	0,75189	13	$y = ax / (b + x)$	0,99078	0,97816
6	$y = ae^{bx}$	0,68108	0,75189	14	$y = ae^{b/x}$	0,99164	0,98160
7	$y = a \cdot 10^{bx}$	0,68108	0,75189	15	$y = a \cdot 10^{b/x}$	0,99163	0,98160
8	$y = 1 / (a + be^{-x})$	0,99116	0,98769	16	$y = a + bx^n$	0,61800	0,74831

На рис. 2 показані фактичні та теоретичні графічні залежності коефіцієнтів звукопоглинання для різних будівельних матеріалів від частоти звукових хвиль.

Порівняння фактичних та теоретичних даних показало, що теоретичні коефіцієнти звукопоглинання для різних будівельних матеріалів залежно від частот звукових хвиль, розраховані за допомогою рівнянь регресії (1), (2) несуттєво відрізняються від даних, наведених в роботі [23], що підтверджує визначену раніше точність отриманих залежностей на рівні 0,99164 та 0,98796, відповідно.

З рис. 2 видно, що коефіцієнт звукопоглинання плит з ніздрюватого бетону за збільшення частоти звукових хвиль зростає за гіперболічно-експоненціальною залежністю, а коефіцієнт звукопоглинання акустичного фіброліту за збільшення частоти звукових хвиль зростає за логарифмічною залежністю. При цьому плити з ніздрюватого бетону мають кращі звукоізоляційні властивості ніж акустичний фіброліт на усьому досліджуваному діапазоні частот звукових хвиль 125 – 4000 Гц.

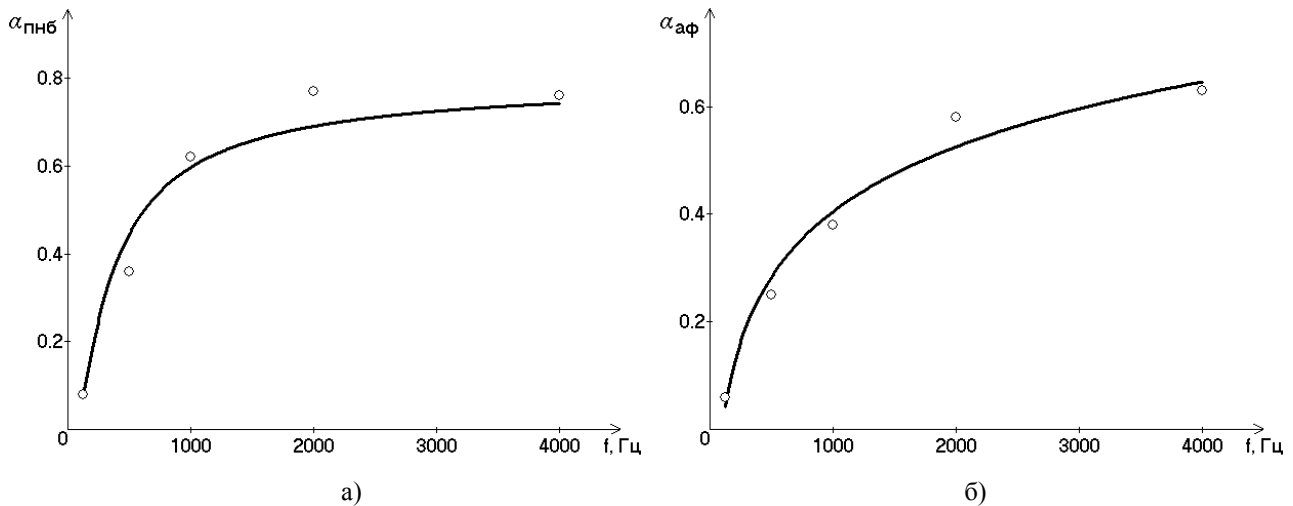


Рис. 2. Зміна коефіцієнтів звукопоглинання плит з ніздрюватого бетону (а) та акустичного фіброліту (б) за збільшення частоти звукових хвиль

Висновки

1. У результаті проведеного дослідження було встановлено, що резонансні звукопоглиначі відіграють важливу роль у формуванні акустичного середовища закритих приміщень. Їхня селективна здатність до поглинання звукових хвиль у вузькому діапазоні частот робить їх незамінними у випадках, коли необхідне точне регулювання акустичних параметрів, наприклад у концертних залах, студіях звукозапису чи лекційних аудиторіях. Проведений аналіз класифікації звукопоглиначів підтвердив, що ефективність акустичного поглинання значною мірою залежить від структури матеріалів.

2. Визначено регресійні залежності коефіцієнтів звукопоглинання для різних будівельних матеріалів (плит з ніздрюватого бетону та акустичного фіброліту) від частоти звукових хвиль, які можуть бути використані під час розробки методики інженерних розрахунків параметрів звукоізоляційних будівельних матеріалів.

3. Побудовано графічну інтерпретацію залежностей коефіцієнтів звукопоглинання для різних будівельних матеріалів від частоти звукових хвиль, яка дозволяє наочно проілюструвати ці залежності та показати збіжність теоретичних результатів з фактичними на рівні 0,99164 та 0,98796, відповідно.

4. Встановлено, що коефіцієнт звукопоглинання плит з ніздрюватого бетону за збільшення частоти звукових хвиль зростає за гіперболічно-експоненціальною залежністю, а коефіцієнт звукопоглинання акустичного фіброліту за збільшення частоти звукових хвиль зростає за логарифмічною залежністю. При цьому плити з ніздрюватого бетону мають кращі звукоізоляційні властивості ніж акустичний фіброліт на усьому досліджуваному діапазоні частот звукових хвиль 125 – 4000 Гц.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Biochar from residual biomass as a concrete filler for improving thermal and acoustic properties / D. Cuthbertson et al. *Biomass and Bioenergy*. 2019. № 120. P. 77–83.
2. Lu T. J., Chen F., He D. Sound absorption of semi-open-cell cellular metals. *Journal of the Acoustical Society of America*. 2000. № 108 (4). P. 1697–1709.
3. Sound-absorbing materials made by embedding waste rubber crumb in a concrete matrix / Z. Ghizdăveț et al. *Construction and building materials*. 2016. P. 755–763. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.145>.
4. Jones M. R., Ozlutas K., Zheng L. High-concentration fly ash foam concrete with ultra-low density. *Journal of Concrete Research*. 2017. № 69 (22). P. 1146–1156. <https://doi.org/10.1680/jmacr.17.00063>
5. Fly ash-based geopolymer foams using silica as a pore-forming agent: physical, mechanical and acoustic properties / Y. Luna-Galiano et al. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2018. № 500. P. 196–204.
6. Vázquez V. F., Paje S. E. Investigation of pavement properties that control the acoustic characteristics of rubberized

asphalt mixtures. *Applied Acoustics*. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2015.09.008>.

7. Mechanical and acoustic properties of alkali-reinforced slag foam concretes containing lightweight structural aggregates / M. Mastali et al. *Construction and Building Materials*. 2018. № 187. P. 371–381.

8. Degrave-Lemeurs M., Glé P., de Menibus A. H. Acoustic properties of hemp concretes for thermal insulation of buildings: Application to clay and lime binders. *Construction and Building Materials*. 2018. № 160. P. 462–474.

9. Attenborough K. Models of the acoustic characteristics of air-filled granular materials. *Acta Acustica*. 1983. № 1. P. 213–226.

10. Allard J. F. Sound propagation in porous materials having a rigid frame. *Propagation of sound in porous media: modelling sound absorbing materials*. Dordrecht: Springer Netherlands, 1993. P. 79–117.

11. Goroshenkov K. V., Swift M. J. Acoustic properties of granular materials with a pore size distribution close to the logarithmic normal. *Journal of the Acoustical Society of America*. 2001. № 110 (5). P. 2371–2378.

12. Modeling the effect of pore structure on the acoustic absorption of concrete with increased porosity / N. Neitalat et al. *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2005. № 3 (1). P. 29–40.

13. Maa D. Y. Microperforated panel broadband absorber. *Noise Control Engineering Journal*. 1987. № 29. P. 77–84.

14. Kim H. K., Lee H. K. Modeling acoustic absorption of porous concrete taking into account the gradation and shape of aggregates and the void ratio. *Journal of Sound and Vibration*. 2010. № 329. P. 866–879.

15. Bhutta M. A., Tsuruta K., Mirza J. Evaluation of properties of high-performance porous concrete. *Construction and building materials*. 2012. № 31. P. 67–73.

16. Narayanan N., Ramamurthy K. Microstructural studies of aerated concrete. *Cement and concrete research*. 2000. № 30 (3). P. 457–464.

17. Acoustic absorption of hemp-lime construction / O. Kinnane et al. *Construction and Building Materials*. 2016. №122. P. 674–682.

18. Pedroso M., Brito J., Silvestre J. Characterization of eco-efficient (traditional and innovative) sound absorption materials. *Revista International*. 2017. №41 (15). P. 4–16.

19. Contribution to the uncertainty of in-situ air sound insulation measurements / C. R. A. Monteiro et al. *42nd International Congress and Exhibition on Noise Control Techniques (INTER-NOISE)*. 2013. P. 1–10.

20. Сердюк В. Р., Лемешев М. С., Христич О. В. Проблеми стабільності формування макроструктури ніздрюватих газобетонів безавтоклавного твердіння. *Будівельні матеріали, виробництво та санітарна техніка*. 2011. № 40. С. 166–170.

21. Залежність теплотехнічних та фізико-механічних властивостей ніздрюватих бетонів від параметрів виготовлення / В. П. Очеретний та ін. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2009. № 2. С. 34–39.

22. Лемешев М. С., Березюк О. В. Ніздрюваті бетони з використанням промислових відходів. *Перспективні інновації в науці, освіті, виробництві та транспорті 2017: матеріали міжнародної науково-практичної Інтернет-конференції*. SWorld, 2017. 7 с.

23. Товарознавство тепло- та звукоізоляційних матеріалів і виробів в енергозберігаючих технологіях. 2-ге вид. виправл. та доповн. : підручник / Захарченко П. В., Гавриш О. М., Захаренков Р. Д., Павлик А. В. К. : КНУБА, ДГПУ, «Центр учбової літератури», 2019. 400 с.

24. Михалевич В. М., Шевчук О. І., Буга Н. Л. Математичні системи комп'ютерної алгебри як засіб підвищення ефективності і якості освітнього процесу з вищої математики. *Сучасні інформаційні технології та інноваційні методики навчання у підготовці фахівців: методологія, теорія, досвід, проблеми* : зб. наук. прац. Випуск 14. Київ-Вінниця : ДОВ «Вінниця», 2007. С. 357–360.

25. Березюк О. В. Комп'ютерна програма "Регресійний аналіз" ("RegAnaliz"). Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 49486. Київ : Державна служба інтелектуальної власності України. Дата реєстрації: 03.06.2013.

26. Березюк О. В. Встановлення регресії параметрів захоронення відходів та потреби в ущільнювальних машинах на основі комп'ютерної програми "RegAnaliz". *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2014. № 1. С. 40-45.

27. Bereziuk O. V. Determination of the regression of the solid waste compaction factor on the height of the polygon on the base of the computer program "RegAnaliz". *Automation of technologies and productions*. 2015. № 2 (8). P. 43–45.

Стаття надійшла до редакції 22.09.2025.

Стаття пройшла рецензування 28.09.2025.

Бричанський Артур Олегович – аспірант 3-го курсу, група 192-22а, Факультет будівництва, цивільної та екологічної інженерії, e-mail: arturbr@gmail.com.

Христич Олександр Володимирович – канд. техн. наук, доцент кафедри будівництва, міського господарства та архітектури.

Вінницький національний технічний університет.