

UDK 628.3:712.3

Kostiantyn Shumbar, Postgraduate student of the Department of Environmental Protection Technologies and Labour Safety

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0000-0201-2142> **e-mail:** k.w.shumbar@gmail.com

Tetiana Tkachenko, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Environmental Protection Technologies and Labour Safety

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2105-5951> **e-mail:** tkachenko.tm@knuba.edu.ua

Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine

ACOUSTIC EFFICIENCY OF GREEN FACADES: EVALUATION OF THE IMPACT OF *PARTHENOCISSUS QUINQUEFOLIA* ON NOISE POLLUTION REDUCTION

Abstract. *The article presents the results of a study of the acoustic efficiency of a green facade formed with Parthenocissus quinquefolia as a natural noise-absorbing barrier in an urban environment. The relevance of the work is due to the growing level of noise pollution, which is one of the leading environmental risk factors in cities. The potential of vertical gardening as an element of sustainable architectural design that combines aesthetic appeal with environmental and functional benefits is investigated. The aim of the study was to quantify the ability of a green facade formed by Parthenocissus quinquefolia to reduce sound pressure levels in the external and internal environment of a residential building. The experimental part was carried out by means of full-scale modelling of a facade fragment in two seasonal states - with and without the existing leaf cover. Acoustic measurements were performed in accordance with the requirements of DSTU B V.2.6-86:2009 under controlled conditions. Additionally, numerical modelling of wave propagation was applied, taking into account changes in the effective density and elastic properties of the medium. The results of the study show that the leaves of Parthenocissus quinquefolia reduce the sound pressure level by up to 20 dB in the mid-frequency range. Even in the absence of leaf cover, a pronounced noise-protective effect is maintained, which confirms the feasibility of using this plant for vertical gardening in the context of reducing noise load. The obtained results deepen the understanding of the acoustic properties of green facades and emphasise the feasibility of their use in the environmentally oriented design of urban spaces.*

Keywords: *green façades; Parthenocissus quinquefolia; noise protection; acoustic efficiency; vertical greening; urban environment; sustainable development; ecological architecture.*

К.В. Шумбар, Т.М. Ткаченко

Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна

АКУСТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗЕЛЕНИХ ФАСАДІВ: ОЦІНКА ВПЛИВУ *PARTHENOCISSUS QUINQUEFOLIA* НА ЗМЕНШЕННЯ ШУМОВОГО ЗАБРУДНЕННЯ

Анотація. *У статті представлено результати дослідження акустичної ефективності зеленого фасаду, сформованого за участю Parthenocissus quinquefolia, як природного шумопоглинального бар'єра в умовах урбанізованого середовища. Актуальність роботи зумовлена зростанням*

рівня шумового забруднення, що належить до провідних екологічних факторів ризику у містах. Досліджено потенціал вертикального озеленення як елементу сталого архітектурного проєктування, який поєднує естетичну привабливість із екологічними та функціональними перевагами. Метою дослідження було кількісне оцінювання здатності зеленого фасаду, утвореного *Parthenocissus quinquefolia*, знижувати рівень звукового тиску у зовнішньому та внутрішньому середовищі житлової будівлі. Експериментальна частина реалізована шляхом натурного моделювання фрагмента фасаду у двох сезонних станах – із наявним листковим покривом та без нього. Акустичні вимірювання виконано відповідно до вимог ДСТУ Б В.2.6-86:2009 у контрольованих умовах. Додатково застосовано чисельне моделювання хвильового поширення з урахуванням змін ефективної густини та пружних властивостей середовища. Результати дослідження свідчать, що листя *Parthenocissus quinquefolia* забезпечує зменшення рівня звукового тиску до 20 дБ у середньочастотному діапазоні. Навіть за відсутності листкового покриву зберігається виражений шумозахисний ефект, що підтверджує доцільність використання цієї рослини для вертикального озеленення в контексті зниження шумового навантаження. Отримані результати поглиблюють уявлення про акустичні властивості зелених фасадів і підкреслюють доцільність їх застосування в екологічно орієнтованому проєктуванні міських просторів.

Ключові слова: зелені фасади; *Parthenocissus quinquefolia*; шумозахист; акустична ефективність; вертикальне озеленення; урбаністичне середовище; сталий розвиток; екологічна архітектура.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.3.153-162>

Вступ

Інтенсивна урбанізація, що супроводжується зростанням транспортного потоку та розширенням інженерної інфраструктури, зумовлює низку екологічних проблем, серед яких однією із найактуальніших є шумове забруднення [1]. Основними джерелами шуму в міському середовищі виступають автомобільний, залізничний і повітряний транспорт, а також промислові об'єкти. Надмірний рівень шуму чинить негативний вплив на стан довкілля та здоров'я населення, зокрема спричиняє стрес, розлади сну, зниження когнітивної працездатності та загального самопочуття [2]. За класифікацією Всесвітньої організації охорони здоров'я, шум є другим за значущістю екологічним фактором ризику після забруднення атмосферного повітря [3].

Традиційні методи шумозахисту, зокрема звукоізоляційні матеріали, шумозахисні екрани та оптимізація міської інфраструктури, характеризуються високою вартістю та складністю впровадження. Ефективною альтернативою зниження шумового забруднення є зелені конструкції, зокрема зелені стіни та дахи, які поєднують екологічну ефективність із шумопоглинальними властивостями рослинного покриву, сприяючи природному зниженню рівня шуму [4]. Зелені конструкції в урбанізованому середовищі забезпечують широкий спектр екосистемних послуг, включаючи підтримку біорізноманіття, регулювання водного стоку, підвищення енергоефективності будівель, зниження інтенсивності міського теплового острова, уловлювання зважених часток, покращення якості повітря та зменшення рівня шумового забруднення. Ці переваги є важливими для адаптації до зміни клімату та пом'якшення

наслідків урбанізації в містах [5]. Окрім цих екологічних аспектів, дослідження підкреслюють потенціал зелених конструкцій у покращенні акустичних умов як на вулицях, так і в приміщеннях.

У контексті зростаючих екологічних викликів, що супроводжують урбанізацію, зростає потреба у впровадженні ефективних рішень. Однією з ключових тенденцій сучасного архітектурного проектування є орієнтація на принципи сталого будівництва, спрямовані на мінімізацію негативного впливу на довкілля та підвищення рівня комфорту для людини. Для об'єктивної оцінки екологічності будівель розроблено низку міжнародних рейтингових систем, зокрема LEED (США), BREEAM (Велика Британія), DGNB (Німеччина) тощо. Ці системи ґрунтуються на сукупності кількісних і якісних показників, що охоплюють характеристики енергоефективності, екологічної безпеки, якості внутрішнього мікроклімату та експлуатаційної ефективності. Застосування таких стандартів не лише сприяє раціональному використанню ресурсів, а й забезпечує економічну доцільність протягом життєвого циклу будівлі.

У цьому контексті особливу увагу заслуговує застосування зелених фасадів – систем вертикального озеленення, які поєднують естетичну привабливість із функціональними властивостями, зокрема здатністю знижувати рівень шумового забруднення. Представлене дослідження спрямоване на оцінку акустичної ефективності озеленення фасаду за допомогою *Parthenocissus quinquefolia* (дикий виноград п'ятилистий) як природного шумозахисного елемента в умовах міського середовища [6].

Використання систем вертикального озеленення фасадів розглядається як ефективний інструмент сталого будівництва, що сприяє покращенню мікрокліматичних умов навколо будівель та водночас знижує рівень шуму як зовні, так і всередині приміщень [7]. Зелені фасади, реалізовані у формі фасадних або живих стін, здатні ефективно поглинати та розсіювати звукові хвилі, зменшуючи акустичне навантаження на навколишнє середовище. Дослідження показують, що залежно від типу вертикального озеленення, густоти рослинного покриву та сезонного стану листя, зниження шуму може досягати 10–20 дБ, особливо в середньочастотному діапазоні [8].

Завдяки рослинному покриву на зелених фасадах відбувається ефективне розсіювання та відбиття звукових хвиль, що сприяє створенню комфортного акустичного середовища. Одне з досліджень показало, що зелені стіни здатні знижувати рівень шуму в навколишньому середовищі до 10 децибел, що значно перевищує ефективність традиційних матеріалів, таких як бетон чи скло [9]. Акустична ефективність зелених стін залежить від ряду факторів, включаючи видовий склад рослин, щільність рослинності та характеристики субстрату. Подальші дослідження підтверджують ефективність зелених стін як звукопоглинальних елементів, зазначаючи, що оптимальні параметри субстрату та рослинних конфігурацій можуть забезпечити коефіцієнти звукопоглинання, що перевищують 0,60 [10].

У внутрішніх приміщеннях вертикальне озеленення також надає значні акустичні переваги. Дослідження показали, що зелені стіни в закритих просторах можуть знижувати час реверберації в середньочастотному діапазоні, що значно покращує розбірливість мови [11]. Крім того, вертикальні сади в приміщеннях здатні поглинати до 70% звукової енергії на певних частотах, ефективно зменшуючи шум, що виникає від офісного обладнання та повсякденної діяльності [12]. Особливу увагу привертають дослідження, які

зосереджуються на визначенні коефіцієнтів звукопоглинання зелених стін. Більшість таких досліджень проводиться в лабораторних умовах з використанням імпедансних труб або ревербераційних камер, що дозволяє детально аналізувати внесок окремих компонентів системи, таких як листя, стебла та субстрат. Водночас спостерігається зростання інтересу до оцінки акустичної ефективності зелених фасадів у реальних міських умовах [6, 13, 14].

Дослідження показують, що міська рослинність позитивно впливає на здоров'я людини, зокрема через зменшення рівня шумового забруднення [15]. Вертикальне озеленення ефективно знижує рівень шуму в урбанізованому середовищі завдяки здатності поглинати та розсіювати звукові хвилі. Огляд понад 40 наукових робіт показує, що ці системи особливо результативні в середньому та високочастотному діапазоні, коли конструкція не містить повітряних порожнин або резонансних елементів. Особливу увагу приділено застосуванню зелених фасадів у густозабудованих міських районах та житлових кварталах, де рівень шуму є високим [16].

Метою експериментального дослідження є кількісне оцінювання здатності зеленого фасаду з *Parthenocissus quinquefolia* знижувати рівень звукового тиску у зовнішньому та внутрішньому середовищі житлової будівлі, а також аналіз впливу різних факторів на акустичну ефективність. Особливу увагу приділено впливу листяного покриву на зменшення звукового тиску у внутрішньому просторі з метою підвищення акустичного комфорту мешканців.

Основна частина. Для оцінки шумопоглинальних властивостей рослинного покриву було проведено дослідження акустичної ефективності зелених фасадів із використанням *Parthenocissus quinquefolia*, з урахуванням сезонних змін, що є важливим внеском у формування екологічно орієнтованих архітектурних рішень, які поєднують естетику, екологічність і функціональність [16, 17].

Гіпотеза дослідження ґрунтується на припущенні, що листя *Parthenocissus quinquefolia* [16, 17] утворює природний пористий бар'єр, який здатний до розсіювання та часткового поглинання звукових хвиль. Відповідно, наявність вертикального озеленення на фасаді має сприяти зниженню рівня шуму у приміщенні порівняно з відкритим вікном без озеленення.

У межах дослідження проведено кількісне порівняння акустичних характеристик фасаду за трьох сезонних умов: з повноцінним листяним покривом, під час часткового опадання листя та за його повної відсутності. Це дозволило виявити сезонну змінність акустичних властивостей зеленого фасаду. Для досягнення мети застосовано порівняльний підхід на основі кількісного аналізу акустичних параметрів у різних умовах функціонування фасаду. Метод передбачає натурне моделювання фрагмента фасаду з варіативною зміною його структури – від повного озеленення до часткової або повної відсутності листяного покриву.

Акустичні вимірювання в межах дослідження проводилися відповідно до вимог національного стандарту ДСТУ Б В.2.6-86:2009 [18], що регламентує методи визначення звукоізоляційних характеристик огорожувальних конструкцій. Дотримання вимог нормативного документа забезпечило належний рівень об'єктивності результатів та їх порівнюваність, що є необхідною умовою для науково обґрунтованої оцінки акустичної ефективності зеленого фасаду як засобу шумозахисту.

З метою мінімізації впливу неконтрольованих зовнішніх чинників та підвищення достовірності експериментальних даних вимірювання проводилися в умовах контрольованого середовища – закритому приміщенні. Такий підхід дозволив усунути вплив сторонніх джерел шуму та створити стабільні параметри акустичного середовища, що сприяло отриманню точних і репрезентативних результатів.

Для реалізації експериментального дослідження акустичної ефективності зеленого фасаду з використанням *Parthenocissus quinquefolia* був виготовлений натурний макет фасаду будівлі з жорсткого матеріалу – піностерольної коробки, що імітувала фрагмент огорожувальної конструкції. Такий макет дозволив точно відтворити умови, характерні для реальних міських будівель, що сприяє кращому розумінню ефективності зелених фасадів у контексті зменшення рівня шуму в урбанізованих середовищах (рис. 1). Як джерело шуму використовувалась аудіосистема, яка відтворювала попередньо записаний урбаністичний шум з фіксованим рівнем гучності. Це забезпечило стабільність та повторюваність експериментальних умов, дозволяючи уникнути впливу змінних факторів, таких як непередбачувані зміни в рівні шуму, що могли б спотворити результати дослідження.

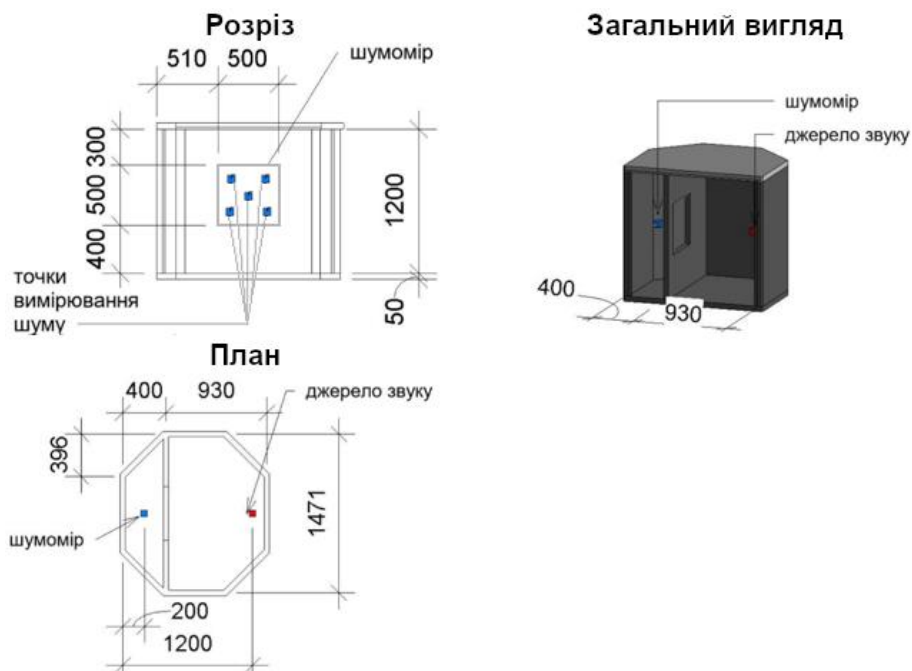


Рис. 1. Макет експериментального модуля для дослідження акустичної ефективності зеленого фасаду з використанням *Parthenocissus quinquefolia*

Під час експериментів шумомір розміщувався всередині експериментального модуля на відстані 0,2 метра від внутрішньої поверхні фасадної стіни, що дозволяло точно фіксувати рівень шуму безпосередньо поблизу фасаду. Джерело шуму розташовувалося на відстані 1,2 метра від фасаду, напроти нього, що імітувало звукове навантаження, характерне для міських умов, де джерела шуму, такі як транспорт або будівельні роботи, можуть бути розташовані на значних відстанях від будівель.

Завдяки такій конфігурації, дослідження змогло точніше моделювати умови реальних міських середовищ і оцінити ефективність зелених фасадів з рослиною *Parthenocissus quinquefolia* у зниженні рівня шуму та покращенні акустичного комфорту. Сталість експериментальних умов забезпечила отримання репрезентативних даних, що можуть бути застосовані до різних урбанізованих територій.

Експериментальна частина дослідження включала два основні етапи, кожен з яких мав на меті вивчення сезонної змінності акустичних характеристик вертикального озеленення на прикладі рослини *Parthenocissus quinquefolia*.

Етап 1. Зимова конфігурація. Фасад покривався гілками та стеблами *Parthenocissus quinquefolia* без листя, що відповідало умовам зимового або міжсезонного періоду. Такий стан дозволяв оцінити базовий рівень акустичної ефективності озеленення за відсутності листкової маси.

Етап 2. Вегетаційна конфігурація. На фасад наносився повний листковий покрив цієї ж рослини, характерний для періоду активної вегетації. Це дозволило визначити вплив щільного листяного шару на здатність системи знижувати рівень звукового тиску.

Для кожного з варіантів було виконано серію з восьми акустичних вимірювань. Дані опрацьовувалися з визначенням середніх значень рівня звукового тиску (у дБ), після чого здійснювалось порівняння результатів двох конфігурацій. Такий підхід дозволив кількісно оцінити зміну шумозахисної ефективності фасаду залежно від сезонного стану рослинного покриття.

Отримані результати становлять важливу основу для формулювання висновків щодо акустичних переваг використання *Parthenocissus quinquefolia* в системах вертикального озеленення для створення комфортного середовища в житлових будівлях протягом року.

Аналіз результатів дослідження ґрунтувався на застосуванні методів математичного моделювання процесів хвильового поширення, відбиття та розсіювання звуку в середовищі з неоднорідною структурою, сформованою елементами зеленого фасаду. Зокрема, розглядалася взаємодія звукових хвиль з пористим рослинним шаром, включаючи стебла, листя та повітряні проміжки між ними. Це дозволило оцінити вплив геометричних та фізичних характеристик рослинного покриття на зміну акустичного тиску в контрольованих умовах.

Процес загасання шуму включає кілька основних механізмів: геометричне затухання, поглинання звуку стеблами рослин та атмосферне затухання. Коефіцієнт поширення звукової хвилі через покриття *Parthenocissus quinquefolia* було визначено за формулою (1), яка описує зміну властивостей звукової хвилі при проходженні через середовище, що містить рослинні елементи цього виду, також враховує його ефективну густину ρ_{eff} та здатність матеріалу передавати коливання C_{eff} , що впливає на поширення хвиль в середовищі:

$$\frac{\Gamma}{k_0} = j \sqrt{\frac{\rho_{eff}}{\rho_0} \cdot \frac{C_{eff}}{C_0}}, \quad (1)$$

де: Γ – характеристика хвильового процесу (коефіцієнт загасання); k_0 – хвильовий вектор; j – уявна одиниця; ρ_{eff} та ρ_0 – ефективна та початкова густина, відповідно; C_{eff} та C_0 – ефективна та початкова пружність (або інший модуль, що характеризує матеріал).

Ефективна густина середовища розраховувалась з урахуванням внеску рослинних елементів, таких як стебла *Parthenocissus quinquefolia*, у зміну акустичних властивостей за рівнянням (2):

$$\frac{\rho_{eff}}{\rho_0} = 1 + j \frac{8\mu}{\pi(k_0\alpha)^2} \sum \sqrt{D_n}, \quad (2)$$

де ρ_{eff} – ефективна густина середовища, що містить елементи *Parthenocissus quinquefolia*; ρ_0 – початкова густина середовища (повітря); j – уявна одиниця; μ – параметр, що характеризує в'язкість або інші фізичні властивості середовища; k_0 – хвильовий вектор; α – розмір включень (наприклад, середній радіус рослинних елементів); $\sum \sqrt{D_n}$ – сума членів D_n , які можуть бути коефіцієнтами розсіювання або характеристиками взаємодії хвиль із середовищем.

Ефективну пружність середовища було визначено за рівнянням (3):

$$\frac{c_{eff}}{c_0} = 1 + j \frac{8\mu}{\pi(k_0\alpha)^2} (0,5D_0 + \sum \sqrt{D_n}). \quad (3)$$

Затухання шуму на одиничну довжину хвилі розраховувалось за (4):

$$(-\Delta L)\lambda_0 = 8,686 \cdot \frac{2\pi}{\lambda_0} \text{Re}\{\Gamma\}, \quad (4)$$

де ΔL – зміна рівня втрат звукової хвилі; коефіцієнт затухання, λ_0 – довжина хвилі у вихідному середовищі; число 8,686 пов'язане з переходом від натурального логарифма до десяткового логарифма (оскільки $\lg(e) \sim 0,4343$); $\frac{2\pi}{\lambda_0}$ – хвильове число у вихідному середовищі; $\text{Re}\{\Gamma\}$ – дійсна частина комплексного коефіцієнта затухання Γ , яка визначає витрати енергії при поширенні хвилі [19].

Результати експериментального дослідження показали, що рослинне покриття *Parthenocissus quinquefolia* впливає на поширення звуку через зміну ефективної густини та пружності середовища. Затухання шуму відбувається за рахунок геометричного розсіювання, поглинання енергії рослинними елементами та атмосферного затухання. В результаті середовище з рослинним покриттям знижує рівень шуму, змінюючи швидкість та інтенсивність звукових хвиль.

Покриття *Parthenocissus quinquefolia* навіть у зимовий період забезпечувало певний рівень шумозахисту, що вказує на важливість цього виду рослин для зниження акустичного навантаження в міських умовах на різних етапах року. На рисунку 2 представлені результати дослідження, які ілюструють затухання шуму в залежності від частоти для *Parthenocissus quinquefolia* з листям та без нього. Аналіз даних дозволяє зробити такі висновки:

- у літній період (коли рослина має повний листковий покрив) рівень шумопоглинання є значно вищим, особливо в діапазоні високих частот, що пояснюється щільним покриттям листя, яке ефективно поглинає та розсіює звукові хвилі;

- взимку, при відсутності листя, шумозахисні властивості покриття знижуються, але все ж залишаються значними. Це свідчить про те, що навіть без листової маси рослина зберігає свою ефективність як бар'єр для звукових хвиль завдяки своїй структурі, включаючи стебла та гілки, які частково поглинають і розсіюють звук;

- густота покриття є ключовим фактором у зменшенні рівня шуму. Чим щільніше розташовані елементи рослини (стебла, листя), тим більшу ефективність показує покриття щодо поглинання звукових хвиль. Таким чином, оптимізація густоти рослинного покриття може значно підвищити акустичну ефективність зелених фасадів.

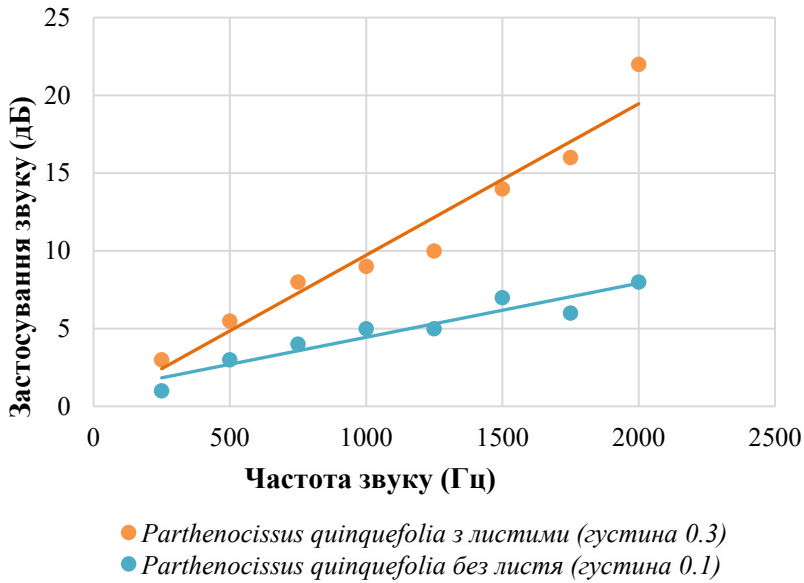


Рис. 2. Порівняння затухання шуму для *Parthenocissus quinquefolia* з листям та без нього

За результатами експерименту було зафіксовано значне зниження рівня шуму в умовах, коли макет був покритий рослиною *Parthenocissus quinquefolia*. Найбільш ефективним виявився варіант з повністю облистяним покриттям, де середнє зниження рівня шуму порівняно з відкритою поверхнею становило приблизно 20 дБ.

У конфігурації з виноградом без листя також спостерігалось зниження рівня шуму, хоча воно було менш виражене. Це підтверджує важливу роль листової маси в акустичному поглинанні та розсіюванні звукових хвиль, що, в свою чергу, підтримує гіпотезу про те, що зелені фасади можуть бути ефективними природними шумопоглинаючими бар'єрами, особливо в період активної вегетації, коли рослини мають максимальну біомасу.

Отримані результати узгоджуються з іншими науковими дослідженнями, які вказують на здатність щільної рослинності на фасадах та покрівлях будівель зменшувати акустичне навантаження на мешканців і покращувати загальний звуковий комфорт у міських умовах.

Таким чином, використання рослини *Parthenocissus quinquefolia* як елементу вертикального озеленення може стати ефективним рішенням для пасивного шумозахисту в умовах сучасної урбанізації.

Висновки

Дослідження показало, що рослинне покриття *Parthenocissus quinquefolia* суттєво знижує рівень шуму, змінюючи ефективну густину та пружність середовища, що сприяє затуханню звукових хвиль через геометричне розсіювання, поглинання енергії рослинами та атмосферне затухання. Це покриття забезпечує ефективний шумозахист навіть у зимовий період, хоча його ефективність знижується за відсутності листя. Влітку, з листям, рівень шумопоглинання є вищим, особливо на високих частотах. Густота покриття є ключовим фактором, що визначає ступінь зниження рівня шуму.

Зважаючи на те, що акустичні характеристики зелених конструкцій ще не є повністю дослідженими, подальші дослідження повинні враховувати такі аспекти, як вплив рівнів насичення субстрату, його ущільнення та складу, різних типів гідрофільних шарів і опорних систем на коефіцієнт звукопоглинання. Дослідження також повинні бути спрямовані на оптимізацію характеристик рослинного покриття для досягнення максимальної ефективності в різних кліматичних зонах. Морфологія рослин є важливим фактором, що визначає ефективність зелених конструкцій у зменшенні шуму. Краще розуміння механізмів взаємодії цих факторів із специфічними характеристиками рослин дозволить оптимізувати ці технології для контролю шуму як у зовнішньому середовищі, так і в приміщеннях. Це зробить важливий внесок у поліпшення міської акустичної екології та екологічного дизайну. Крім того, доцільно провести масштабні польові дослідження з реальними будівлями, а також дослідити інші види рослин і типи субстратів, які можуть впливати на акустичні характеристики фасадів.

Застосування таких рішень у міському середовищі може стати частиною концепції сталого розвитку, зокрема біокліматичної архітектури, яка передбачає інтеграцію природних елементів у штучно створене середовище для покращення мікроклімату, зниження енергоспоживання та забезпечення шумозахисту.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. Park, K.; Lee, J. (2024). Mitigating Air and Noise Pollution through Highway Capping: The Bundang-Suseo Highway Cap Project Case Study. *Environmental Pollution*, 346, 123620, doi:10.1016/j.envpol.2024.123620.
2. Arsalan, M.; Chamani, A.; Zamani-Ahmadmahooodi, R. (2024). Sustaining Tranquility in Small Urban Green Parks: A Modeling Approach to Identify Noise Pollution Contributors. *Sustainable Cities and Society*, 113, 105655, doi:10.1016/j.scs.2024.105655.
3. Schwela, D.H. (2000). The World Health Organization Guidelines for Environmental Noise. *Noise news int.*, 8, 9–22, doi:10.3397/1.3703044.
4. Ngcobo, N.; Akinradewo, O.; Mokoena, P. (2024). Evaluating the Measures to Promote Sustainable Transport Infrastructure: A Case of City of Johannesburg, South Africa. *Journal of Engineering*, 2024, 6372226, doi:10.1155/je/6372226.
5. Cosola, V.O.-D.; Navacerrada, M.Á.; Ruiz-García, L.; Olivieri, F. (2024). Evaluating the Acoustic Absorption of Modular Green Walls: Laboratory and Field Assessments Using An Impedance Gun.
6. Oquendo-Di Cosola, V.; Olivieri, F.; Ruiz-García, L. (2022). A Systematic Review of the Impact of Green Walls on Urban Comfort: Temperature Reduction and Noise Attenuation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 162, 112463, doi:10.1016/j.rser.2022.112463.

7. Shushunova, N.; Korol, E.; Luzay, E.; Shafieva, D.; Bevilacqua, P. (2022). Ensuring the Safety of Buildings by Reducing the Noise Impact through the Use of Green Wall Systems. *Energies*, 15, 8097, doi:10.3390/en15218097.
8. Connelly, M.; Hodgson, M. (2013). Experimental Investigation of the Sound Transmission of Vegetated Roofs. *Applied Acoustics*, 74, 1136–1143, doi:10.1016/j.apacoust.2013.04.003.
9. Van Renterghem, T.; Botteldooren, D.; Verheyen, K. (2012). Road Traffic Noise Shielding by Vegetation Belts of Limited Depth. *Journal of Sound and Vibration*, 331, 2404–2425, doi:10.1016/j.jsv.2012.01.006.
10. Pérez, G.; Coma, J.; Barreneche, C.; De Gracia, A.; Urrestarazu, M.; Burés, S.; Cabeza, L.F. (2016). Acoustic Insulation Capacity of Vertical Greenery Systems for Buildings. *Applied Acoustics*, 110, 218–226, doi:10.1016/j.apacoust.2016.03.040.
11. Scamoni, F.; Scrosati, C.; Depalma, M.; Barozzi, B. (2022). Experimental Evaluations of Acoustic Properties and Long-Term Analysis of a Novel Indoor Living Wall. *Journal of Building Engineering*, 47, 103890, doi:10.1016/j.jobbe.2021.103890.
12. Davis, M.J.M.; Tenpierik, M.J.; Ramírez, F.R.; Pérez, M.E. (2017). More than Just a Green Facade: The Sound Absorption Properties of a Vertical Garden with and without Plants. *Building and Environment*, 116, 64–72, doi:10.1016/j.buildenv.2017.01.010.
13. Laforteza, R.; Sanesi, G. (2019). Nature-Based Solutions: Settling the Issue of Sustainable Urbanization. *Environmental Research*, 172, 394–398, doi:10.1016/j.envres.2018.12.063.
14. Azkorra, Z.; Pérez, G.; Coma, J.; Cabeza, L.F.; Bures, S.; Álvaro, J.E.; Erkoreka, A.; Urrestarazu, M. (2015). Evaluation of Green Walls as a Passive Acoustic Insulation System for Buildings. *Applied Acoustics*, 89, 46–56, doi:10.1016/j.apacoust.2014.09.010.
15. Attal, E.; Côté, N.; Shimizu, T.; Dubus, B. (2019). Sound Absorption by Green Walls at Normal Incidence: Physical Analysis and Optimization. *Acta Acustica united with Acustica*, 105, 301–312, doi:10.3813/AAA.919313.
16. Bakker, J.; Lugten, M.; Tenpierik, M. (2023). Applying Vertical Greening Systems to Reduce Traffic Noise in Outdoor Environments: Overview of Key Design Parameters and Research Methods. *Building Acoustics*, 30, 315–338, doi:10.1177/1351010X231171028.
17. Ottelé, M. *The Green Building Envelope: Vertical Greening*; TU Delft: Delft, 2011; ISBN 978-90-90-26217-8.
18. DSTU B V.2.6-86:2009 “Constructions of buildings and structures. Sound insulation of enclosing structures. Measurement methods”. Kyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine, 2010. [ДСТУ Б В.2.6-86:2009 «Конструкції будинків і споруд. Звукоізоляція огорожувальних конструкцій. Методи вимірювання». Київ: Мінрегіонбуд України, 2010].
19. Chern, C.J.; Beutler, E. (1976). Biochemical and Electrophoretic Studies of Erythrocyte Pyridoxine Kinase in White and Black Americans. *Am J Hum Genet*, 28, 9–17.

Стаття надійшла до редакції 03.07.2025 і прийнята до друку після рецензування 11.09.2025

The article was received 03.07.2025 and was accepted after revision 11.09.2025

Шумбар Костянтин Вікторович

аспірант кафедри технологій захисту навколишнього середовища та охорони праці Київського національного університету будівництва і архітектури

Адреса робоча: 03037 Україна, м. Київ, пр-т Повітряних Сил, 31

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0000-0201-2142> e-mail: k.w.shumbar@gmail.com

Ткаченко Тетяна Миколаївна

д.т.н., професорка, завідувачка кафедри технологій захисту навколишнього середовища та охорони праці Київського національного університету будівництва і архітектури

Адреса робоча: 03037, Україна, м. Київ, пр-т Повітряних Сил, 31

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2105-5951> e-mail: tkachenko.tm@knuba.edu.ua