АНОТАЦІЯ

Кучин І. О. Неоднорідні метаматеріали та конструкції для захисту споруд від сейсмічних та вібраційних впливів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 192 – Будівництво та цивільна інженерія. – Український державний університет науки і технологій, Дніпро, 2026.

Дисертація присвячена розробці та чисельному обґрунтуванню неоднорідних метаматеріальних конструкцій для захисту будівель і споруд від сейсмічних та техногенних вібраційних впливів. У роботі розглянуто двовимірні періодичні бетонно-гумові конструкції фундаментного типу, здатні формувати заборонені зони пружних хвиль у низькочастотному діапазоні. Запропонований підхід ґрунтується на використанні принципів фононних кристалів і механічних метаматеріалів, у яких ослаблення передачі коливань досягається завдяки керованій взаємодії хвильового поля з періодичною неоднорідністю. Досліджено двокомпонентні комірки з гумовим включенням і трикомпонентні локально-резонансні комірки з гумовим кільцем та важким сталевим ядром. Для цих конструкцій побудовано дисперсійні діаграми, визначено межі та ширину заборонених зон, проаналізовано вплив геометричних і матеріальних параметрів на положення робочого частотного діапазону, а також розглянуто скінченний періодичний масив у нестаціонарній постановці.

Актуальність роботи обумовлена необхідністю розвитку ефективних пасивних засобів захисту споруд від низькочастотних динамічних впливів, зокрема сейсмічних хвиль, транспортних та промислових вібрацій. Традиційні підходи до сейсмічного та вібраційного захисту не завжди забезпечують достатньо вибіркове пригнічення коливань у заданому частотному діапазоні за прийнятних конструктивних параметрів. Періодичні метаматеріальні системи відкривають можливість формування частотних інтервалів, у яких поширення пружних хвиль істотно послаблюється. Разом з тим для

будівельних застосувань залишаються недостатньо дослідженими питання вибору архітектури бетонно-гумової комірки, переходу від спектральних характеристик нескінченної періодичної структури до оцінювання скінченного конструктивного масиву, масштабного налаштування захисного частотного діапазону та врахування невизначеності фізико-механічних властивостей матеріалів.

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, показано зв'язок роботи з науковими програмами і темами, сформульовано мету та задачі дослідження, визначено об'єкт, предмет і методи дослідження, наукову новизну та практичне значення одержаних результатів, наведено відомості про особистий внесок здобувача, апробацію результатів та публікації.

У **першому розділі** проведено огляд та проаналізовано сучасний стан досліджень у галузі захисту будівель і споруд від сейсмічних та техногенних вібраційних впливів із застосуванням періодично-неоднорідних структур, фононних кристалів і механічних метаматеріалів. Розглянуто традиційні підходи до динамічного захисту конструкцій і показано їхні обмеження щодо ефективного ослаблення низькочастотних хвиль у заданому частотному діапазоні. Проаналізовано механізми формування заборонених зон у періодичних структурах, зокрема брегівське розсіяння та локальний резонанс, а також приклади їх використання у фононних кристалах, метаматеріальних фундаментах і метабар'єрах. Особливу увагу приділено двовимірним бетонно-гумовим системам із круговими включеннями, локально-резонансним коміркам з важкими ядрами, методам числового визначення зонних діаграм та проблемі переходу від нескінченної періодичної структури до скінченного конструктивного масиву. Розглянуто вплив розкиду фізико-механічних характеристик матеріалів на положення та ширину заборонених зон і можливість застосування апарату нечітких множин для опису такої невизначеності. Встановлено, що недостатньо дослідженими залишаються питання порівняння двокомпонентних і трикомпонентних бетонно-гумових комірок в єдиній чисельній постановці, масштабного налаштування захисного

частотного діапазону, перевірки частотно-вибіркового ослаблення у скінченному масиві та оцінювання чутливості результатів до зміни властивостей бетону, гуми і сталі. На основі проведеного аналізу визначено напрямок наукових досліджень дисертації та шляхи вирішення поставлених задач.

У **другому розділі** розглянуто теоретико-методологічні засади аналізу хвильових процесів у періодично-неоднорідних середовищах, які використано для подальшого чисельного дослідження бетонно-гумових метаматеріальних конструкцій. Викладено метод Флоке–Блоха як основний інструмент переходу від нескінченної періодичної структури до розрахунку одиничної комірки з квазіперіодичними граничними умовами. Розглянуто дискретну двовимірну модель, у якій проаналізовано періодичні й антиперіодичні моди, акустичні та оптичні гілки, а також умови виникнення частотних інтервалів, де поширення хвиль пригнічується. Наведено аналітичні співвідношення для модельних періодичних систем, розглянуто вплив демпфування та довгохвильові неперервні наближення. Метод Флоке–Блоха поширено на неперервне волокнисте середовище з періодичними включеннями, після чого сформульовано скінченноелементну постановку задачі про власні частоти одиничної комірки. Визначено дві базові архітектури для подальшого дослідження: двокомпонентну бетонно-гумову комірку з суцільним гумовим включенням і трикомпонентну локально-резонансну комірку з бетонною матрицею, гумовим кільцем та сталевим ядром. Задано фізико-механічні характеристики матеріалів, граничні умови Флоке–Блоха, маршрут обходу першої зони Бриллюена та вихідні умови для чисельного визначення заборонених зон у розділі 3.

У **третьому розділі** виконано чисельне дослідження заборонених зон у двокомпонентних і трикомпонентних бетонно-гумових періодичних конструкціях у межах плоскої задачі лінійної теорії пружності з граничними умовами Флоке–Блоха. Сформовано геометричні моделі двох архітектур комірки: бетонної матриці з суцільним гумовим включенням та бетонної

матриці з гумовим кільцем і важким сталевим ядром. Для обох типів конструкцій задано єдині матеріальні параметри, скінченноелементну постановку, маршрут обходу першої зони Бриллюена Г–Х–М–Г та робочий критерій виділення забороненої зони за контурним критерієм. Проведено перевірку збіжності за рівнем скінченноелементної сітки, що підтвердило чисельну стійкість отриманих меж заборонених зон. Для двокомпонентної бетонно-гумової комірки при базових параметрах отримано першу заборонену зону за контурним критерієм 30,10–30,30 Гц шириною близько 0,21 Гц; встановлено, що ця зона не є чисельним артефактом, однак має малу практичну ширину. Для трикомпонентної локально-резонансної комірки з гумовим кільцем і сталевим ядром при тих самих зовнішніх розмірах включення визначено першу заборонену зону 19,70–27,77 Гц шириною 8,07 Гц. Аналіз форм власних коливань на нижній і верхній межах цієї зони показав, що її формування пов’язане з відносним рухом важкого ядра у податливому гумовому прошарку та концентрацією деформацій у гумовому кільці, тобто з локально-резонансним механізмом, а не лише з брегівським розсіюванням на періодичній неоднорідності. Досліджено вплив площової частки включення на межі заборонених зон; для трикомпонентної конструкції у розглянутому діапазоні встановлено монотонне зниження нижньої межі та зростання ширини першої зони, тоді як для двокомпонентної конструкції перша зона залишається вузькою. Окремо виконано масштабування геометрії комірки та підтверджено обернено пропорційний зв’язок між розміром комірки і частотами меж забороненої зони. Показано, що збільшення масштабу конструкції дозволяє переносити першу заборонену зону з діапазону десятків герц до частот одиниць герц, зокрема до верхньої частини сейсмічно та вібраційно релевантного діапазону. Отримані результати визначили трикомпонентну бетонно-гумову локально-резонансну архітектуру як основний об’єкт подальшого дослідження у скінченній нестаціонарній постановці.

У **четвертому розділі** виконано перехід від спектрального аналізу нескінченної періодичної комірки до оцінювання фактичного ослаблення коливань у скінченному масиві трикомпонентних бетонно-гумових комірок. Розроблено нестаціонарну скінченноелементну модель у постановці плоскої деформації, у якій скінченний масив порівнюється з еталонною бетонною моделлю тієї самої геометрії без включень. Передачу коливань оцінено за піковою швидкістю в контрольних точках, на основі чого визначено частотно-залежний коефіцієнт передачі та вставні втрати. Для базового масиву з розміром комірки 0,4 м встановлено, що у межах першої зони, визначеної для нескінченної періодичної комірки у третьому розділі, спостерігається додатне ослаблення відносно еталонної моделі, насамперед у нижній і центральній частині діапазону 20–26 Гц, де вставні втрати становлять близько 1,7–2,1 дБ. Показано, що ділянка безпосередньо вище першої зони, зокрема 28–30 Гц, є майже прохідною, тоді як в інших позазонних інтервалах можуть виникати локальні максимуми ослаблення, пов’язані з особливостями відповіді скінченного масиву. Досліджено вплив кількості комірок уздовж напряму поширення хвилі; встановлено систематичне зростання вставних втрат зі збільшенням довжини масиву. Виконано масштабування скінченного масиву до більших розмірів комірки і показано перенесення ділянок ослаблення до нижчих частот, що якісно узгоджується із законом подібності, встановленим для нескінченної періодичної структури. Проведено контроль стійкості результатів до зменшення кроку інтегрування за часом. Результати розділу показали якісну узгодженість між положенням забороненої зони нескінченної трикомпонентної комірки та частотно-вибірковим ослабленням у скінченному масиві, а також сформували основу для подальшого уточнення таких конструкцій з урахуванням ґрунтових умов, схеми споруди та граничних умов.

У **п’ятому розділі** досліджено вплив невизначеності фізико-механічних характеристик матеріалів на параметри заборонених зон бетонно-гумової редукованої розрахункової моделі, що використовується для оцінювання чутливості таких структур до зміни властивостей компонентів. Для опису

можливого розкиду властивостей бетону, гуми та сталі застосовано апарат нечітких множин і рівневий аналіз, що дозволяє оцінювати межі зміни частотних характеристик за умов обмеженої статистичної інформації. Розглянуто вплив модулів пружності, густин і коефіцієнтів Пуассона компонентів на нижню та верхню межі першої забороненої зони, її ширину і центральну частоту. У межах редукованої моделі встановлено, що зміна пружних характеристик і густин компонентів може зміщувати межі забороненої зони та впливати на її ширину; найбільш помітний внесок пов'язаний із параметрами гумового шару та густинами компонентів. Показано, що зміна матеріальних характеристик може не лише зміщувати межі забороненої зони, а й впливати на її ширину, тому врахування невизначеності є необхідним етапом попереднього обґрунтування метаматеріальних конструкцій для задач сейсмічного та вібраційного захисту. На основі отриманих результатів сформульовано практичні рекомендації щодо вибору архітектури комірки, геометричного масштабу та матеріальних параметрів бетонно-гумових періодичних систем. Показано, що поєднання локально-резонансної трикомпонентної комірки, масштабного налаштування геометрії та оцінювання чутливості до матеріальної невизначеності формує розрахункову основу для подальшого розроблення метаматеріальних фундаментів, метабар'єрів і захисних конструкцій, призначених для ослаблення сейсмічних та техногенних вібраційних впливів.

Ключові слова: пружні хвилі, механічні метаматеріали, заборонені зони, локальний резонанс, бетонно-гумові конструкції, сейсмічний та вібраційний захист, метод скінченних елементів, чисельне моделювання, напружено-деформований стан, гомогенізація, континуалізація, залізобетонні конструкції, бетон, фізико-механічні характеристики, нечіткі множини.

ABSTRACT

Kuchyn I. O. Heterogeneous Metamaterials and Structures for the Protection of Buildings and Structures against Seismic and Vibration Effects. – Qualifying scientific work on the rights of a manuscript.

Dissertation submitted for the degree of Doctor of Philosophy (PhD) in specialty 192 – Building and Civil Engineering. Ukrainian State University of Science and Technology. Dnipro, 2026.

The dissertation is devoted to the development and numerical substantiation of heterogeneous metamaterial structures for protecting buildings and structures against seismic and technogenic vibration effects. The work considers two-dimensional periodic concrete–rubber foundation-type structures capable of forming elastic-wave band gaps in the low-frequency range. The proposed approach is based on the principles of phononic crystals and mechanical metamaterials, in which vibration transmission is reduced through the controlled interaction of the wave field with periodic heterogeneity. Two-component unit cells with a rubber inclusion and three-component locally resonant unit cells with a rubber ring and a heavy steel core are investigated. For these structures, dispersion diagrams are constructed, band-gap boundaries and widths are determined, the influence of geometric and material parameters on the operating frequency range is analyzed, and a finite periodic array in a transient formulation is considered.

The relevance of the work is determined by the need to develop effective passive means of protecting structures against low-frequency dynamic effects, including seismic waves, transport-induced vibrations, and industrial vibrations. Traditional approaches to seismic and vibration protection do not always provide sufficiently selective suppression of vibrations in a prescribed frequency range while maintaining acceptable structural parameters. Periodic metamaterial systems make it possible to form frequency intervals in which the propagation of elastic waves is significantly attenuated. At the same time, for civil engineering applications, a number of issues remain insufficiently studied, including the selection of the architecture of a concrete–rubber unit cell, the transition from spectral characteristics

of an infinite periodic structure to the assessment of a finite structural array, scale tuning of the protective frequency range, and allowance for uncertainty in the physical-mechanical properties of materials.

The **introduction** substantiates the relevance of the dissertation topic, shows the relation of the work to scientific programs and research topics, formulates the aim and objectives of the study, defines the object, subject, and research methods, presents the scientific novelty and practical significance of the obtained results, and provides information on the personal contribution of the applicant, approbation of the results, and publications.

The **first chapter** reviews and analyzes the current state of research in the field of protecting buildings and structures against seismic and technogenic vibration effects using periodically heterogeneous structures, phononic crystals, and mechanical metamaterials. Traditional approaches to dynamic protection of structures are considered, and their limitations in terms of effective attenuation of low-frequency waves within a specified frequency range are shown. The mechanisms of band-gap formation in periodic structures are analyzed, including Bragg scattering and local resonance, as well as examples of their use in phononic crystals, metamaterial foundations, and metabarriers. Special attention is paid to two-dimensional concrete–rubber systems with circular inclusions, locally resonant unit cells with heavy cores, methods for numerical determination of band diagrams, and the problem of transition from an infinite periodic structure to a finite structural array. The influence of scatter in the physical-mechanical characteristics of materials on the position and width of band gaps is considered, along with the possibility of applying fuzzy-set theory to describe such uncertainty. It is established that the issues of comparing two-component and three-component concrete–rubber unit cells within a unified numerical formulation, scale tuning of the protective frequency range, verification of frequency-selective attenuation in a finite array, and assessment of the sensitivity of results to changes in the properties of concrete, rubber, and steel remain insufficiently studied. Based on the analysis, the direction

of the dissertation research and the ways of solving the formulated tasks are determined.

The **second chapter** considers the theoretical and methodological foundations for analyzing wave processes in periodically heterogeneous media, which are used for the subsequent numerical study of concrete–rubber metamaterial structures. The Floquet–Bloch method is presented as the main tool for reducing an infinite periodic structure to the calculation of a single unit cell with quasi-periodic boundary conditions. A discrete two-dimensional model is considered, in which periodic and antiperiodic modes, acoustic and optical branches, and the conditions for the occurrence of frequency intervals where wave propagation is suppressed are analyzed. Analytical relations for model periodic systems are presented, and the influence of damping and long-wave continuum approximations is considered. The Floquet–Bloch method is extended to a continuous fibrous medium with periodic inclusions, after which the finite element formulation of the eigenfrequency problem for a unit cell is formulated. Two basic architectures are defined for further study: a two-component concrete–rubber unit cell with a solid rubber inclusion and a three-component locally resonant unit cell consisting of a concrete matrix, a rubber ring, and a steel core. The physical-mechanical properties of the materials, Floquet–Bloch boundary conditions, the path along the boundary of the first Brillouin zone, and the initial conditions for the numerical determination of band gaps in Chapter 3 are specified.

The **third chapter** presents a numerical study of band gaps in two-component and three-component concrete–rubber periodic structures within the framework of the plane problem of linear elasticity with Floquet–Bloch boundary conditions. Geometric models of two unit-cell architectures are formed: a concrete matrix with a solid rubber inclusion and a concrete matrix with a rubber ring and a heavy steel core. For both types of structures, unified material parameters, a finite element formulation, the Γ–X–M–Γ path along the first Brillouin zone, and a working criterion for identifying a band gap according to the contour criterion are specified. Mesh convergence is verified, confirming the numerical stability of the obtained

band-gap boundaries. For the two-component concrete–rubber unit cell with the basic parameters, the first band gap according to the contour criterion of 30.10–30.30 Hz with a width of approximately 0.21 Hz is obtained; it is established that this band gap is not a numerical artifact but has a small practical width. For the three-component locally resonant unit cell with a rubber ring and a steel core, under the same external inclusion dimensions, the first band gap of 19.70–27.77 Hz with a width of 8.07 Hz is determined. The analysis of eigenmodes at the lower and upper boundaries of this band gap shows that its formation is associated with the relative motion of the heavy core in the compliant rubber layer and the concentration of deformations in the rubber ring, that is, with a locally resonant mechanism rather than only with Bragg scattering on periodic heterogeneity. The influence of the inclusion area fraction on the band-gap boundaries is investigated; for the three-component structure in the considered range, a monotonic decrease in the lower boundary and an increase in the width of the first band gap are established, whereas the first band gap of the two-component structure remains narrow. Geometric scaling of the unit cell is also performed, confirming an inversely proportional relationship between the unit-cell size and the frequencies of the band-gap boundaries. It is shown that increasing the scale of the structure makes it possible to shift the first band gap from the range of tens of hertz to frequencies of a few hertz, including the upper part of the seismic and vibration-relevant frequency range. The obtained results identify the three-component concrete–rubber locally resonant architecture as the main object for further investigation in a finite transient formulation.

The **fourth chapter** performs the transition from the spectral analysis of an infinite periodic unit cell to the assessment of actual vibration attenuation in a finite array of three-component concrete–rubber unit cells. A transient finite element model is developed in a plane-strain formulation, in which the finite array is compared with a reference homogeneous concrete model of the same geometry without inclusions. Vibration transmission is evaluated using peak velocity at the control points, on the basis of which the frequency-dependent transmission

coefficient and insertion loss are determined. For the basic array with a unit-cell size of 0.4 m, it is established that within the first band gap determined for the infinite periodic unit cell in Chapter 3, positive attenuation relative to the reference model is observed, primarily in the lower and central part of the 20–26 Hz range, where the insertion loss is approximately 1.7–2.1 dB. It is shown that the interval immediately above the first band gap, in particular 28–30 Hz, is almost transmissive, whereas local attenuation maxima may occur in other out-of-gap intervals due to the specific response of the finite array. The influence of the number of unit cells along the wave propagation direction is investigated; a systematic increase in insertion loss with increasing array length is established. Scaling of the finite array to larger unit-cell sizes is performed, and the shift of attenuation intervals to lower frequencies is shown to be qualitatively consistent with the similarity law established for the infinite periodic structure. The stability of the results with respect to a reduced time-integration step is checked. The results of the chapter show qualitative agreement between the position of the band gap of the infinite three-component unit cell and frequency-selective attenuation in the finite array, and also form the basis for further refinement of such structures with allowance for soil conditions, the structural scheme of the building, and boundary conditions.

The **fifth chapter** investigates the influence of uncertainty in the physical-mechanical characteristics of materials on the band-gap parameters of a reduced concrete–rubber computational model used to assess the sensitivity of such structures to variations in component properties. To describe the possible scatter in the properties of concrete, rubber, and steel, fuzzy-set theory and level-wise analysis are applied, which make it possible to estimate the ranges of variation in frequency characteristics under conditions of limited statistical information. The influence of elastic moduli, densities, and Poisson’s ratios of the components on the lower and upper boundaries of the first band gap, its width, and its central frequency is considered. Within the reduced model, variations in the elastic properties and densities of the components are shown to shift the band-gap boundaries and affect the band-gap width; the most pronounced influence is associated with the rubber

layer parameters and component densities. It is shown that changes in material characteristics may not only shift the boundaries of the band gap but also affect its width; therefore, allowance for uncertainty is a necessary stage in the preliminary substantiation of metamaterial structures for seismic and vibration protection problems. Based on the obtained results, practical recommendations are formulated regarding the choice of unit-cell architecture, geometric scale, and material parameters of concrete–rubber periodic systems. It is shown that the combination of a locally resonant three-component unit cell, geometric scale tuning, and sensitivity assessment with respect to material uncertainty forms a computational basis for the further development of metamaterial foundations, metabarriers, and protective structures intended to attenuate seismic and technogenic vibration effects.

Keywords: elastic waves, mechanical metamaterials, band gaps, local resonance, concrete-rubber structures, seismic and vibration protection, finite element, numerical modelling, stress-strain state, homogenization, continualization, reinforced concrete structures, concrete, physical-mechanical characteristics, fuzzy sets.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях України та виданнях, що індексуються у міжнародних наукометричних базах

1. Volchok D., Danishevskyy V., Slobodianiuk S., **Kuchyn I.** Fuzzy sets application in the problems of structural mechanics and optimal design. Acta Mechanica. 2023. Vol. 234. P. 6191–6204. DOI: 10.1007/s00707-023-03713-0. **(особистий внесок:** формулювання задачі, оцінювання отриманих результатів та узагальнення підходів, використаних у дисертаційній роботі для оцінювання чутливості заборонених зон**).**

2. **Кучин І. О.** Двовимірні ґрунтові метаструктури та періодичні фундаменти для вібросейсмічного захисту: огляд. Український журнал будівництва та архітектури. 2026. № 2 (032). С. 160–166. DOI: 10.30838/UJCEA.2312.290426.160.1237. **(особистий внесок:** аналіз джерел за темою дослідження, систематизація підходів до використання двовимірних метаструктур і періодичних фундаментів, узагальнення сучасного стану досліджень для задач вібраційного та сейсмічного захисту будівель і споруд**).**

3. Данішевський В. В., **Кучин І. О.** Двовимірні бетонно-гумові періодичні конструкції для захисту будівель від вібрацій та сейсмічних навантажень. Український журнал будівництва та архітектури. 2026. № 3 (033). С. 62–66. DOI: 10.30838/UJCEA.0333.270526.62.1243. (**особистий внесок:** розроблення чисельних моделей двовимірних бетонно-гумових періодичних конструкцій, виконання розрахунків заборонених зон, аналіз впливу геометричних параметрів комірки на положення та ширину захисного частотного діапазону, підготовка висновків щодо застосування таких конструкцій для вібраційного та сейсмічного захисту).

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

4. Bezverkhyi D., **Kuchyn I.**, Danishevskyy V. Propagation of elastic transient waves in 1D periodically heterogeneous structures. *Науково-практична*

конференція студентів, аспірантів і молодих вчених (Дніпро, 27–28 березня 2023 р.). Дніпро: ПДАБА, 2023. С. 358–360.

5. Андріанов І., Данішевський В., Безверхий Д., **Кучин І.** Шаруваті конструкції для вібро- та сейсмоізоляції. *Стародубовські читання – 2023: матеріали XXXIII науково-практичної конференції* (Дніпро, 19 квітня 2023 р.). Дніпро, 2023. С. 5–7.

6. Danishevskyy V., **Kuchyn I.** Splash effects in propagation of elastic waves in heterogeneous structures. *Інноваційні технології забезпечення параметрів комфорту, енергоефективності і екологічності житлових будівель на основі смарт-технологій: матеріали міжнародної науково-практичної конференції.* 2024. С. 21–23.

7. **Kuchyn I.** Investigation of the Impact of Geometric Configuration on Wave Attenuation in a Composite Beam with Circular Inclusions. *Mathematical modeling and experimental studies of civil and mechanical engineering problems: abstracts of the scientific and practical conference* (Bratislava, 28 January 2025). Bratislava: ROEZ, s.r.o., 2025. P. 12. DOI: 10.30838/PSACEA.978-966-3232-52-3

8. Данішевський В., **Кучин І. О.** Вплив конфігурації круглих включень на затухання хвиль у композитній балці. *Сучасні проблеми механіки у конструкціях спеціального призначення: збірник матеріалів міжнародної науково-технічної конференції MPMSPS-2025* (Дніпро, 26–28 березня 2025 р.). Дніпро, 2025. С. 144–146.

9. Danishevskyy V., **Kuchyn I.,** Bezverkhyi D. Band gaps in seismic metamaterials: two-layer unit cell and design maps. *Innovative Technologies in Construction, Civil Engineering and Architecture: proceedings of the XX International Scientific and Practical Conference*. 2025. P. 406–407.

10. Shekhorkina S., Bezverkhyi D., **Kuchyn I.** Sound transmission loss of an eco-wall with CLT and straw insulation. *Innovative Technologies in Construction, Civil Engineering and Architecture: proceedings of the XX International Scientific and Practical Conference*. 2025. P. 407–409.