

УДК 004.94:624.046:624.012.25

DOI <https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2025.4.2.36>

СКІНЧЕННО-ЕЛЕМЕНТНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПІДСИЛЕНИХ СКЛАДНО-НАВАНТАЖЕНИХ ДЕФОРМОВАНИХ ЦЕГЛЯНИХ КОЛОН БУДІВЕЛЬ З МЕТОЮ ВЛАШТУВАННЯ ВБУДОВАНИХ СПОРУД ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ ІЗ СТАЛЕЗАЛІЗОБЕТОНУ

Усенко Д. В. – PhD, доцент кафедри хімії та фізики

Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

ORCID ID: 0000-0001-7133-0638

Пенц М. В. – аспірантка кафедри будівельних конструкцій

Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

ORCID ID: 0000-0001-8974-8557

Ільченко Т. М. – аспірантка кафедри будівництва та цивільної інженерії

Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

ORCID ID: 0000-0002-5034-3955

Вахненко Г. В. – аспірант кафедри будівництва та цивільної інженерії

Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

ORCID ID: 0009-0006-9689-9445

У статті на основі аналізу пошкоджень цегляних складно-навантажених конструкцій (стін, простінків, колон) громадської будівлі, що виникли після тривалих температурно-вологісних впливів в результаті перебування будівлі у незавершеному незаконсервованому стані, та із використанням пропозицій з підвищення несучої здатності цегляної кладки шляхом влаштування сталевих обойм викладено хід та результати скінченно-елементного моделювання підсиленних складно-навантажених деформованих цегляних колон будівель з метою влаштування вбудованих споруд цивільного захисту із сталезалізобетону. Створення скінченно-елементної моделі для визначення напружено-деформованого стану чисельних зразків та її аналіз у пружній стадії роботи виконувались по дев'яти ступеневому алгоритму, а саме: вибір системи координат, створення геометрії моделі, задавання властивостей матеріалів, вибір типу та розбиття на скінченні елементи просторової геометрії, задавання граничних умов (типу опор), формування системи навантажень, перевірка коректності розробленої моделі, вибір типу та налаштування параметрів скінченно-елементного аналізу та проведення власне самого аналізу. Опис кроків виконання вказаного алгоритму під час скінченно-елементного аналізу підсиленних цегляних колон дублюється пояснюючими зрозумілими скрінами з програмного комплексу. У другій половині статті наведено результати скінченно-елементного аналізу підсиленних сталевими обоймами цегляних колон. Внаслідок проведення розрахунків методом скінченних елементів за допомогою електронно-обчислювальних машин отримано графіки розподілу відносно головних осей напружень і деформацій на поверхні та в будь-якому перерізі моделі на поверхні цегляної кладки до та після підсилення, а також по довжині елементів сталевих обойми підсилення, що показані на діаграмах.

Ключові слова: споруди цивільного захисту, цегляні колони, сталева обойма, пошкодження, підсилення, скінченно-елементне моделювання.

Usenko D. V., Pents M. V., Ilchenko T. M., Vakhnenko H. V. Finite element modeling of reinforced complexly loaded deformed brick columns of buildings for the purpose of constructing built-in steel reinforced concrete civil defense structures made

Based on the analysis of damage to brick complex-loaded structures (walls, partitions, columns) of a public building that occurred after prolonged temperature and humidity effects as a result of the building being in an unfinished, non-preserved state, and using proposals to increase the bearing capacity of brickwork by installing steel cages, the article describes the course and results of finite-element modeling of reinforced complex-loaded deformed brick columns of buildings for the purpose of constructing built-in civil structures. The creation of a finite element model for determining the stress-strain state of numerical samples and its analysis in the elastic stage of work were carried out according to a nine-step algorithm, namely: selection of a coordinate system, creation of model geometry, setting material properties, selection of the type and division into finite elements of spatial geometry, setting boundary conditions (type of supports), formation of a load system, verification of the correctness of the developed model, selection of the type and setting of finite element analysis parameters, and conducting the actual. The description of the steps of this algorithm during the finite element analysis of reinforced brick columns is duplicated by explanatory screenshots from the software package. The second half of the paper presents the results of a finite-element analysis of brick columns reinforced with steel cages: stress distributions on the surface of the brickwork before and after reinforcement, as well as along the length of the steel cage elements, are shown. As a result of calculations using the finite element method with the help of electronic computers, graphs of distribution relative to the main axes of stresses and strains on the surface and in any cross-section of the models were obtained.

Key words: civil defense structures, brick columns, steel cage, damage, reinforcement, finite element modeling.

Постановка проблеми. Внаслідок збройної агресії росії все більшої актуальності набуває питання розширення фонду захисних споруд цивільного захисту населення [1]. Досить велика кількість споруд подвійного призначення, що є одними із споруд цивільного захисту населення, мають цегляні огорожувальні конструкції. Для забезпечення несучої здатності таких огорожувальних конструкцій відповідно ДБН В.2.2-5:2023 [2], необхідно виконувати їх підсилення, що в переважній більшості зводиться до влаштування сталевих обойм чи дублюючих сталезалізобетонних елементів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Цегляні конструкції є традиційним і ефективним рішенням для багатопверхового житлового будівництва, в підвальних поверхах якого зазвичай розташовують захисні споруди подвійного призначення цивільного захисту [3]. Популярність цегляних конструкцій обумовлена низкою важливих переваг, таких як висока міцність, теплоізоляційні властивості, вогнестійкість та довговічність. При зведенні із цегли будівель житлового і громадського призначення використовують два основні підходи застосування цегляних конструкцій: несучі цегляні стіни та цегляні перегородки в каркасних будинках.

Замокання та руйнування цегляної кладки в результаті тривалих температурно-вологісних впливів є серйозними проблемами, що виникають через різні фактори зовнішнього впливу [4]. Основними причинами пошкоджень є безпосереднє потрапляння вологи, яка призводить до деградації матеріалу. Основними типовими характерними пошкодження цегляних конструкцій є [5]: похилі та хрестоподібні тріщини в простінках і глухих стінах; вертикальні тріщини в місцях сполучення повздовжніх і поперечних стін з можливим випаданням стін назовні; горизонтальні тріщини в стінах, частіше на рівні низу віконних прорізів, перемичок або у рівні обпирання перекриття; тріщини у місцях закладання залізобетонних перемичок; тріщини хаотичного напрямку в стінах, які являють собою суму перерахованих вище.

Зважаючи на вище сказане, дослідження методів відновлення [6], а також підвищення несучої здатності цегляних конструкцій на постійні навантаження від

власної ваги конструкцій стіни і перекриття, тимчасові навантаження на перекриття, товщини снігового покриву, а також додаткового тиску від дії можливої ударної хвилі [7], є актуальною недостатньо дослідженою задачею.

Скінченно-елементне моделювання будівельних конструкцій дозволяє виконати детальний аналіз та передбачення їхньої поведінки під навантаженням, що в свою чергу може бути основою оптимізації конструкції та виявлення слабких місць з метою забезпечення безпеки та довговічності будівель. Під час скінченно-елементного аналізу будівельних конструкцій зазвичай конструкція розділяється на велику кількість простих геометричних елементів (скінченних елементів), кожен з яких має свої властивості (матеріал, геометрію). За допомогою спеціального програмного забезпечення розраховується поведінка кожного скінченного елемента в залежності від навантажень та граничних умов. Результати аналізу представляються у вигляді деформацій, напружень, переміщень та інших параметрів, які допомагають інженерам оцінити конструкцію [8].

Формулювання завдання дослідження. Метою дослідження є проведення скінченно-елементного моделювання підсилених складно-навантажених деформованих цегляних колон будівель з метою влаштування вбудованих споруд цивільного захисту із сталезалізобетону.

Виклад основного матеріалу. За результатами аналізу пошкоджень цегляних складно-навантажених конструкцій на прикладі стін, простінків, колон громадської будівлі, що виникли після тривалих температурно-вологісних впливів, визначено, що основним пошкодженням цегляних конструкцій є їх морозобійне руйнування до 40 %, що переважно обумовлено різною пористістю цегли та незахищеністю від атмосферних опадів [9]. Одним із найефективніших способів підсилення цегляної кладки при локальних чи загальних пошкодженнях є використання сталевих обойм з подальшим внутрішнім обетонуванням, в результаті чого створюється композитна система «цегла-сталь-бетон», де всі матеріали працюють спільно, компенсуючи втрату міцності початкової конструкції.

Створення скінченно-елементної моделі для визначення напружено-деформованого стану чисельних моделей конструкцій та їх аналіз у пружній стадії роботи виконувались в наступному порядку [10].

1. Вибір системи координат. При створенні геометрії чисельних моделей використана глобальна декартова прямокутна система координат – система, що складається із трьох взаємно перпендикулярних площин.

2. Створення геометрії моделі. Спочатку створювався плоский поперечний переріз досліджуваної моделі цегляної кладки за допомогою прямих, що задавалися координатами вузлових точок. Об'ємна модель конструкції (цегляна кладка) формувалася шляхом видовження утвореної завчасно по заданих прямих плоскої граничної поверхні на необхідну висоту моделі (див. рис. 1). Для задавання сталевих елементів підсилення попередньо виділено прямі їх розташування у твердому тілі (цегляній кладці). Для цього тверде тіло різалося площинами, на перетині яких утворювалися прямі для послідовного розташування на них сталевих елементів (див. рис. 3).

3. Введення властивостей матеріалів. Матеріали моделі (характеристики цегляної кладки та сталевих елементів підсилення) задавалися окремо як ізотропні. Значення фізико-механічних характеристик матеріалів (модуль пружності Юнга E і коефіцієнт поперечних деформацій ν) бралися згідно діючих нормативних документів. Третя константа – модуль зсуву G – визначалася автоматично по відомому співвідношенню між E та ν .

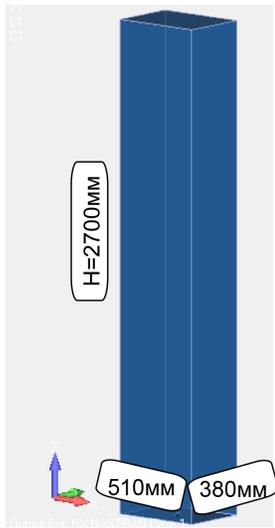


Рис. 1. Об'ємна геометрія цегляної колони

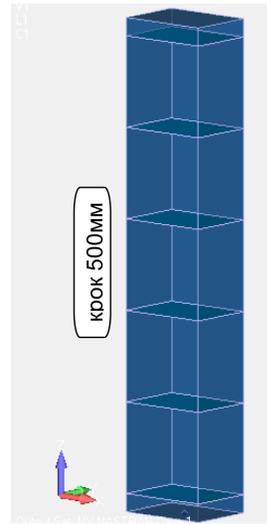


Рис. 2. Розрізана площинами об'ємна геометрія цегляної кладки

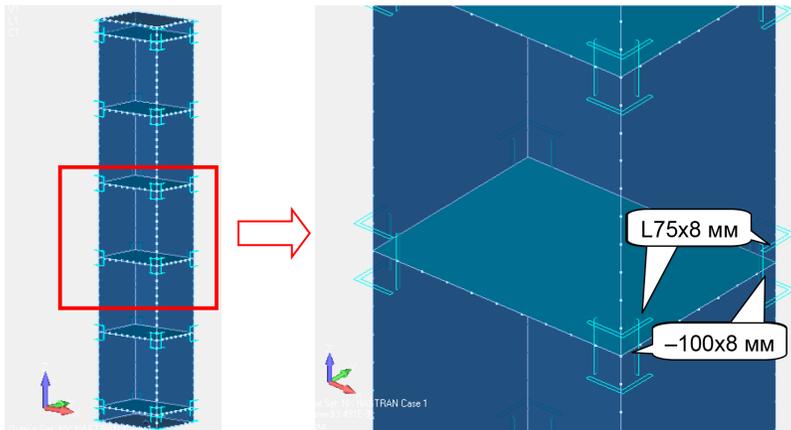


Рис. 3. Розташування на перетині площин сталевих елементів

4. Вибір типу скінченних елементів (СЕ) та розбиття моделі на СЕ. Створена об'ємна геометрична модель «заповнювалася» СЕ. Цегляна кладка розбивалася на тривимірні СЕ типу Hex Mesh (див. рис. 5, а), так як така СЕ сітка має більш регулярну структуру та менше СЕ, у порівнянні із СЕ типу Tet Mesh (див. рис. 5, б). Сталеві елементи підсилення розбивалися на лінійні СЕ, що мали переріз відповідно кутика чи пластини (див. рис. 4). Після розбиття тіла на СЕ виконувалося обов'язкове об'єднання співпадаючих вузлів СЕ цегляної кладки та сталевих елементів, що утворилися у результаті розрізання тіла, для утворення єдиного скінченно-елементного тіла.

5. Задавання граничних умов (опор). Для нижньої горизонтальної площини моделі цегляної кладки заборонялися всі поступальні та одне кутове відносно вертикальної вісі переміщення; для верхньої площини – два поступальних горизонтальних та одне кутове переміщення.

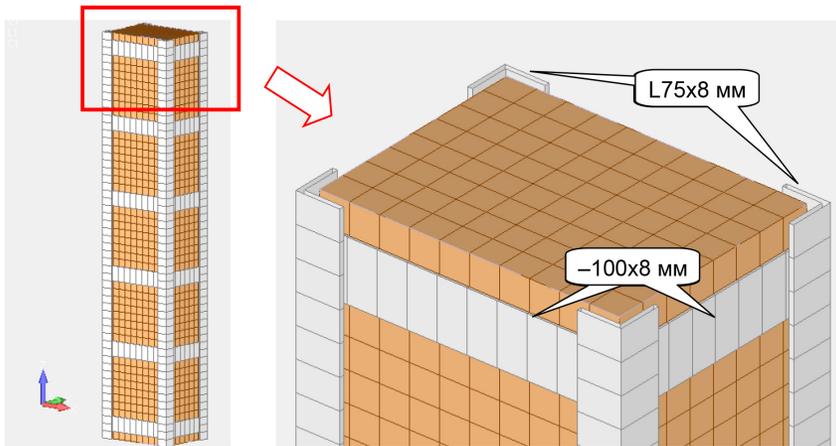


Рис. 4. Лінійні скінченні елементи сталевих елементів підсилення

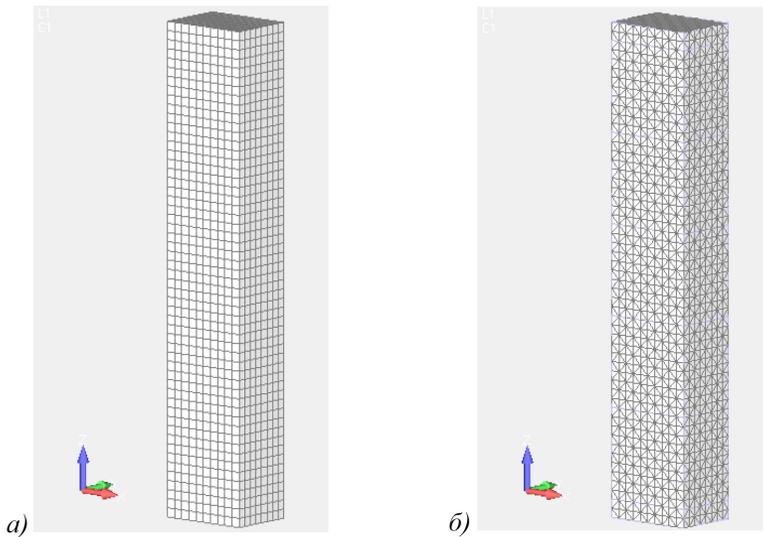


Рис. 5. Модель цегляної кладки, розбита на об'ємні скінченні елементи типу:
а) Hex Mesh (4320 CE; 5445 вузлів CE); б) Tet Mesh (4320 CE; 5445 вузлів CE)

6. Формування системи навантажень та задавання їх значень. Навантаження до моделей зразків прикладалась як статичне рівномірно розподілене по площині верхнього обрізу моделі цегляної кладки.

7. Після створення твердого тіла, видалялися зайві граничні поверхні. Контролювалася якість та симетричність розбиття моделі на CE, кількість об'єднання співпадаючих вузлів CE решітки (п. 4), тип граничних умов, величини прикладених навантажень та поверхні їх поширення (п. 5 і 6).

8. Вибір типу скінченно-елементного аналізу. Під час проведення чисельного моделювання підсилених цегляних колон використано лінійний статичний аналіз (Static). Можливе виконання нелінійного статичного аналізу (Nonlinear Static) із врахуванням дійсної роботи матеріалів (діаграми σ - ϵ).

9. Розрахунок конструкції – скінченно-елементний аналіз. У результаті проведення скінченно-елементного аналізу підсилених складно-навантажених деформованих цегляних колон будівель отримано розподіли напружень на поверхні цегляної кладки до та після підсилення (див. рис. 6), а також по довжині елементів сталевий обійми підсилення (див. рис. 7).

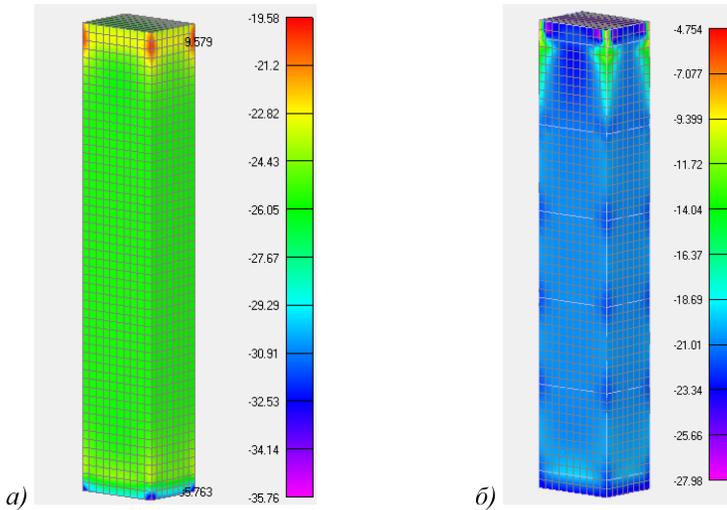


Рис. 6. Розподіл напружень на поверхні цегляної колони:
а) до підсилення ($\sigma_{\max} = -36$ МПа); б) після підсилення ($\sigma_{\max} = -28$ МПа)

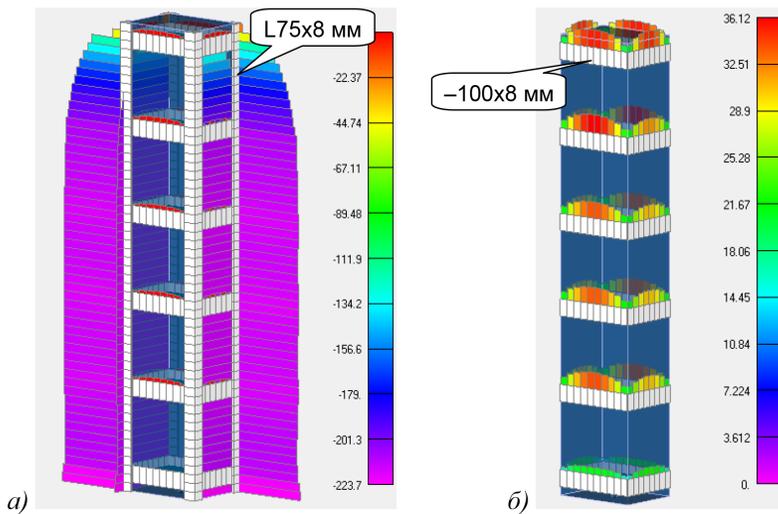


Рис. 7. Розподіли напружень по довжині сталевих елементів підсилення:
а) кутиків обійми ($\sigma_{\max} = -224$ МПа); б) з'єднувальних планок ($\sigma_{\max} = 36$ МПа)

Висновки. Внаслідок проведення розрахунків методом СЕ за допомогою ЕОМ отримано графіки розподілу відносно головних осей напружень і деформацій на поверхні та в будь-якому перерізі моделі.

Стаття підготовлена в рамках науково-технічної роботи «Ресурсоощадні технології прискореного відновлення пошкоджених будівель із влаштуванням захисних споруд цивільного захисту», яка фінансується за рахунок коштів державного бюджету України: держ. реєстр. № 0125U000895.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Тимошенко М. О., Коник С. В. Захиститися від війни: як вдосконалити фонд укриттів в Україні. *Українська правда, розділ економічна правда, інтернет видання*. URL: <https://www.epravda.com.ua/columns/2022/06/15/688187> (дата звернення: 30.01.2025).
2. ДБН В.2.2-5:2023. Захисні споруди цивільного захисту. [Чинний з 01-11-2023]. К. : Мін-во РГТтаІ України, 2023. 115 с.
3. Robert G. D, Ahmad A. H. *Masonry structures behavior and design*. Poland: The masonry society. 2013. 480 p.
4. Семко О. В., Гасенко А. В. Небажаний перерозподіл зусиль в пошкоджених будівельних конструкціях та заходи щодо його усунення. *Тези Всеукр. наук.-пр. форум. «ПЕРЕМОЖЕМО – ВІДБУДУЄМО!»*. 2022. С. 91–93.
5. Довженко О. О., Погрібний В. В., Усенко Д. В. Дефекти і пошкодження кам'яної кладки. *Тези 69-ої наукової конф. професорів, викл., наукових працівників, аспірантів та студентів ун-ту*. 2017. С. 28–30.
6. Соловійов В., Довженко О., Погрібний В., Усенко Д. Відновлення експлуатаційної придатності кам'яної кладки, пошкодженої в умовах надзвичайних ситуацій. *Подолання екологічних ризиків та загроз для довкілля в умовах НС..* 2022. С. 485–496. <https://doi.org/10.23939/monograph2022>
7. Філіпчук С. В., Налєпа О. І., Голуб А. О., Баран Д. Я. Аналіз існуючих архітектурно-конструктивних рішень захисних фортифікаційних споруд. *Зб. наук. пр. «Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди»*. 43. 2023. С. 228–237. DOI: <https://doi.org/10.31713/budres.v0i43.25>
8. Грицеляк Р. В., Вірченко В. М., Самогальський І. І. Аналітична та скінченно-елементна модель будівлі. *Мат. Х Міжн. наук.-пр. конф. молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій»*, 2021. С. 37.
9. Семко О. В., Ільченко Т. М., Семко П. О., Усенко Д. В., Вахненко Г. В. Аналіз пошкодження та пропозиції з відновлення складно-навантаженої деформованої цегляної кладки будівель з можливістю влаштування вбудованих споруд цивільного захисту із сталезалізобетону. *Зб. наук. пр. НУВГП: Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*, 47, 2025. С. 621–629.
10. Usenko, D., Pinchuk, N., Usenko, I., Vakhnenko, H. General principles of creating models of steel-concrete specimens based on spatially reinforced masonry columns. *Матеріали VI Міжн.наук.-техн. конф. «Інтелектуальні конструкції та інноваційні будівельні матеріали»*. Херсон-Кропивницький: ХДАЕУ, 2025. С. 48–52.

REFERENCES:

1. Tymoshenko, M. O., Konyk, S. V. (2022) Zakhystytysia vid viiny: yak vdoskonalyty fond ukryttiv v Ukraini [Protecting from war: how to improve the fund of shelters in Ukraine]. *Ukrainska pravda, ekonomichna pravda, internet vydannia – Ukrainska Pravda, Economic Truth, online edition*. [in Ukrainian].
2. DBN V.2.2-5:2023. Zakhysni sporudy tsyvil'noho zakhystu. [Civil defense structures]. K.: MRHTIU – Ministry of Communities, Territories and Infrastructure Development of Ukraine, 2023. 115 p. [in Ukrainian].
3. Robert, G. D, Ahmad, A. H. (2013) *Masonry structures behavior and design*. Poland: The masonry society. 480 p.

4. Semko, O. V., Hasenko, A. V. (2022) Nebazhanyy pererozpodil zusyly' v poshkodzhennykh budivel'nykh konstruktsiyakh ta zakhody shchodo yoho usunennya [Undesirable redistribution of forces in damaged building structures and measures to eliminate it]. *Tezy dopov. Vseukr. nauk.-pr. forumu "PEREMOZHEMO – VIDBUDUYEMO!" – Theses of report of the All-Ukrainian sc.-pr. forum "WE WILL WIN – WE WILL REBUILD!"*. 91–93. [in Ukrainian].
5. Dovzhenko, O. O., Pohribnyy, V. V., Usenko, D. V. (2017) Defekty i poshkodzhennya kam'yanoyi kladky [Defects and damage to masonry]. *Tezy 69-oyi naukovoyi konferentsiyi profesoriv, vykladachiv, naukovykh pratsivnykiv, aspirantiv ta studentiv universytetu – Abstracts of the 69th Scientific Conference of Professors, Teachers, Researchers, Postgraduate Students and University Students*. 28–30. [in Ukrainian].
6. Solovyov, V., Dovzhenko, O., Pohribnyy, V., Usenko, D. (2022) Vidnovlennya ekspluatatsiyanoi prydatnosti kam'yanoyi kladky, poshkodzhenoї v umovakh nadzvychnaynykh sytuatsiy [Restoration of serviceability of masonry damaged in emergency situations]. *Kolektyvna monohrafiya – a collective monograph*. 485–496. [in Ukrainian].
7. Filipchuk, S. V., Nalepa, O. I., Holub, A. O., Baran, D. Ya. (2023) Analiz isnyuyuchykh arkhitekturno-konstruktyvnykh rishen' zakhysnykh fortyfikatsiynykh sporud [Analysis of existing architectural and structural solutions of defensive fortification structures]. *Zb. nauk. pr. "Resursoekonomni materialy, konstruktsiyi, budivli ta sporudy" – Coll. of sc. works "Resource-saving materials, structures, buildings and structures"*. 43. 228–237. [in Ukrainian].
8. Grytseliak, R., Virchenko, V., Samogalskyy, I. (2021) Analitychna ta skinchenno-elementna model' budivli [Analytical and finite-elemental building model]. *Materialy X Mizhn. nauk.-pr. konf. molodykh uchenykh ta studentiv– Materials of the X Int. Sc.-Prof. Conf. of Young Scientists and Students "Actual Problems of Modern Technologies"*, 37. [in Ukrainian].
9. Semko O. V., Il'chenko T. M., Semko P. O., Usenko D. V., Vakhnenko H. V. (2025) Damage analysis and proposals for the restoration of complex-loaded deformed brickwork of buildings with the possibility of installing built-in civil defense structures made of reinforced concrete. *Coll. of the Sc. Proc. of the NUWHN: Resource-saving materials, structures, buildings and structures*, 47, 621–629. [in Ukrainian].
10. Usenko, D., Pinchuk, N., Usenko, I., Vakhnenko, H. (2025, May 22). General principles of creating models of steel-concrete specimens based on spatially reinforced masonry columns. *Materials of the VI International Scientific and Technical Conference "Intelligent Structures and Innovative Building Materials"*. Kherson-Kropyvnytskyi : KhSAEU, 48–52.

Дата першого надходження рукопису до видання: 25.08.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 19.09.2025

Дата публікації: 30.10.2025