

АНОТАЦІЯ

Волощук В.В. Будівлі з несучими стінами з цегляного мурування в сейсмічних районах. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 192 – Будівництво та цивільна інженерія. – Одеська державна академія будівництва та архітектури, Одеса, 2025.

Дисертаційне дослідження присвячене врахуванню впливу конфігурації та розташування отворів у стінах будівель з цегляного мурування при візуальному оцінюванні сейсмостійкості.

У **вступі** наведено обґрунтування вибору теми дослідження, визначено мету та основні завдання, розкрито наукову новизну та практичну значущість роботи, а також представлено її загальну характеристику та взаємозв'язок із науковими програмами.

У **першому** розділі дисертації представлено аналіз та огляд світового досвіду в сфері оцінювання сейсмостійкості, як в загальному, так і для будівель з цегляного мурування. Візуальне оцінювання сейсмостійкості (ВОС) – це метод оцінювання будівель, заснований на експертному висновку, який формується за результатами візуального огляду споруди. Процес передбачає заповнення спеціальної форми на основі отриманих даних, при цьому обстеження проводиться у стислі терміни. У процесі аналізу літературних джерел було розглянуто методики візуального оцінювання будівель, розташованих у сейсмічно активних районах різних країн. Такі підходи широко застосовуються у світі, зокрема у США, Швейцарії, Новій Зеландії, Індії та Туреччині.

Аналіз світового досвіду дає змогу класифікувати існуючі методи оцінювання сейсмостійкості будівель та споруд на три основні групи: візуальні, інструментальні та чисельні. Візуальні методи, або методи експертного оцінювання, базуються на аналізі стану конструктивних елементів будівель та їх взаємного розташування. Експерти, використовуючи затверджені методики, визначають відповідність несучих конструкцій вимогам нормативних документів. На основі отриманих даних формуються висновки щодо рівня сейсмостійкості об'єкта та рекомендації щодо подальшої експлуатації або необхідності детальнішого обстеження.

Інструментальні методи передбачають визначення характеристик будівель, що впливають на їх технічний стан, із застосуванням спеціалізованих приладів. У багатьох дослідженнях представлено методики оцінювання сейсмостійкості та стійкості конструкцій за допомогою мобільних діагностичних комплексів. Цей підхід ґрунтується на визначенні власних частот коливань будівель із використанням методів динамічного аналізу. Значний внесок у розвиток цього напрямку зробили В. В. Болотін, Н. А. Есеніна, І. В. Сітніков, А. С. Ісайкін, Г. Е. Шаблінський, Д. А. Зубков, Г. М. Нігметов, А. М. Шахраман'ян, Д. В. Главінський, С. Н. Савін.

Чисельні методи моделювання включають кілька підходів, серед яких найбільш поширені модальний аналіз спектра реакції та нелінійні статичні методи розрахунку. Дані методи активно розвиваються як українськими науковцями В. С. Дорофєєв, Ю. І. Немчинов, В. А. Гришин, В. В. Кулябко, С. М. Сафаргалієв, К. В. Єгупов, М. Г. Мар'єнков, О. В. Кичаєва, А. К. Хавкін, так і зарубіжних дослідників Я. М. Айзенберг, О. В. Мкртичев, Peter Faifar та інших.

У **другому** розділі представлено методику проведення лабораторних досліджень. Оскільки наявний житловий фонд України, будівель з цегляного мурування в сейсмічних районах, в більшій частині побудований за серіями радянських часів, то за основу для проведення лабораторних досліджень були взяті фрагменти цегляних стін різних типів, на основі 87-ї типової серії для одеського регіону. Першим етапом для створення фрагментів був підбір складу цементно-вапнякового розчину, задля встановлення марки розчину, яка відповідає серії. Другим етапом було визначення фактичної марки цегли та порівняння її з заявленою виробниками. Третій етап передбачав в собі формування та оснащення трьох типів фрагментів цегляних стін: суцільних (без отвору), з віконним отвором і з дверним отвором - по 2 фрагменти кожного. Фрагменти розмірами 1440 x 1420 мм були виконані з урахування масштабу 1:2 відносно фактичних розмірів стін, оснащенні індикаторами годинникового типу та прогиномірами. Випробування проводились в 2 етапи. Перший етап включав в себе прикладання вертикальних статичних розрахункових навантажень з кроком 10% до досягнення розрахункових значень. Другим етапом було

прикладання навантажень, які виникають при сейсмічних впливах. Відмінною рисою цього дослідження є поетапне прикладання навантажень, при якому одночасно застосовувалися як вертикальні, так і горизонтальні сили до фрагментів. Такий підхід дозволив визначити несучу здатність конструкції, її деформації та особливості розвитку тріщин, що виникають від дії сейсмічних навантажень.

У **третьому** розділі наведено результати лабораторних досліджень

За результатами випробувань підібрано пропорції основних компонентів розчину: в'язучого (шлакопортландцементу марки М400), гашеного вапна, заповнювача (піску), та води. Завдяки оптимальному співвідношенню компонентів вдалось досягти марки розчину М50, що відповідає обраній серії.

Результати випробувань зразків цегли показали, що заявлені виробником марки не завжди відповідають фактичній. Так зразки цегли першого виробника за міцністю на стиск відповідали заявленій марці М100, проте за міцністю на згин значно не відповідали. Зразки другого виробника за міцністю на стиск та згин відповідають заявленій марці М100.

Аналізуючи результати лабораторних випробувань фрагментів цегляних стін встановлено що, зразок без отвору має несучу здатність від дії вертикального статичного та сейсмічного впливу при 255 кН вертикального навантаження та 147 кН горизонтального, при цьому перекося склав 12,16 мм.

За результатами лабораторних випробувань фрагменту цегляної стіни з віконним отвором від дії вертикального статичного та сейсмічного впливу руйнація зразку відбулась на 22 ступені навантаження, що еквівалентно 239,8 кН вертикального навантаження і 80 кН горизонтального навантаження, максимальний перекося склав 13,38 мм.

Результати випробувань фрагменту цегляної стіни з дверним прорізом показали, що руйнація зразку відбулась на 18-му ступені навантаження, що еквівалентно 231,5 кН вертикального навантаження і 51,5 кН горизонтального навантаження, максимальний перекося склав 7,45 мм.

У **четвертому** розділі наведено результати чисельних досліджень сейсмостійкості будівлі з цегляного мурування та її фрагментів з урахуванням

конфігурації отворів. Розрахунки виконувались в розповсюдженому програмному комплексі ЛІРА САПР, це було обумовлено тим, що результати дисертаційної роботи у майбутньому широко використовуватимуться у практиці проектування. З огляду на подальше моделювання будівель в цілому, було вирішено при моделюванні фрагментів відмовитися від підходів мікромоделювання (коли окремими елементами моделюється робота цегли, а окремими робота розчину). Тому в дисертаційній роботі було прийнято модель матеріалу як гомогенізованої нелінійної анізотропної макромоделі. Було виконано розрахунок параметрів чисельної моделі матеріалу кладки. Ключовими моментами, які враховуються при задаванні залежності напруження/деформації для матеріалу кладки є:

- розтяг кладки описується роботою моделі кладки на розтяг в горизонтальному напрямку;
- стиск кладки до точки руйнування кладки описується параболою роботи моделі кладки на стиск у вертикальному напрямку.
- точка залишкової міцності відповідає кривій роботи моделі кладки в горизонтальному напрямку.

Для оцінювання відповідності вибраної моделі роботи матеріалу кладки для подальших розрахунків було виконано чисельне моделювання проведених лабораторних випробувань зразків. Результати показали добру відповідність, як величин так і характеру перекосів зразків на рівні роботи проєктного землетрусу.

Результати чисельного моделювання будівлі з цегляного мурування являли собою розрахунок за двома методами спектральним та нелінійним статичним. В розробленій базовій моделі (відповідно до типової серії, п'яти поверхового житлового будинку) виконувався послідовний демонтаж підвіконних блоків з перетворенням віконних отворів на двірні по всій стіні 1-го поверху, задля оцінювання їх впливу на сейсмостійкість будівлі.

Результати розрахунків за спектральним методом показали що вищенаведена зміна конфігурації отворів, по всій довжині стіни фактично не впливає на періоди коливань будівлі, різниця становить 0,8%.

За результатами нелінійного статичного розрахунку виявлено зростання зруйнованих елементів при більшій кількості змінених в конфігурації отворів та суттєвий перерозподіл внутрішніх зусиль: поява нових отворів з однієї сторони будівлі збільшує концентрацію зусиль на протилежній стіні.

П'ятий розділ містить в собі результати апробації світових методик ВОС, та доповнення існуючої методики візуального оцінювання з прив'язкою до будівель з цегляного мурування.

Апробація світових методів візуального оцінювання сейсмостійкості показала, що одна і та ж будівля відповідно до різних методик має різний результат. Так за Американською методикою оцінювання сейсмостійкості FEMA 154, будівля є не сейсмостійкою і потребує подальших чисельних досліджень. За Новозеландською методикою візуального оцінювання сейсмостійкості, будівля відноситься до класу С, яка є потенційно сейсмонебезпечною проте подальшого оцінювання сейсмостійкості не потребує. За швейцарською методикою ВОС, будівля не відноситься до пріоритетних будівель для її подальшого визначення сейсмостійкості. Розбіжність результатів свідчить про необхідність розробки вітчизняної методики з урахуванням локальних особливостей будівництва та нормативної бази.

Результати лабораторних та числових досліджень дали змогу доповнити існуючу методику ВОС, для будівель з цегляного мурування, яка була апробована на житловому будинку у м. Одеса. За результатами апробації встановлено що будівля є сейсмонебезпечною, завдяки появі нових отворів в несучих стінах і потребує наступного рівня оцінювання сейсмостійкості.

У загальних висновках акцентовано увагу на важливості вирішеної в дисертації задачі та наведено ключові результати проведених досліджень.

Результати отримані в науково-дослідній роботі впроваджені в проєктну діяльність ПП «Капітель-М», у проєктування та конструювання ТОВ «ЗАРС», та при технічному огляду і в подальшому при проєктуванні в діяльності «Служби відновлення та розвитку інфраструктури в Одеській області». Також результати впроваджені в навчальний процес в Одеській державній академії будівництва та архітектури.

Ключові слова: сейсмостійкість будівель, будівлі з цегляного мурування, візуальне оцінювання сейсмостійкості, вплив отворів.

ABSTRACT

Voloshchuk V.V. Buildings with load-bearing walls made of brickwork in seismic areas. Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in the specialty 192 - Civil Engineering and Construction - Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odesa, 2025.

The dissertation study is devoted to taking into account the influence of the configuration and location of openings in the walls of brickwork buildings in the visual assessment of seismic resistance.

The **introduction** provides a rationale for choosing the research topic, defines the purpose and main tasks, reveals the scientific novelty and practical significance of the work, and presents its general characteristics and relationship with scientific programs.

The **first chapter** of the thesis presents an analysis and review of the world experience in the field of seismic resistance assessment, both in general and for brick masonry buildings. Visual evaluation of seismic resistance (hereinafter VESR) is a method of building assessment based on an expert opinion formed based on the results of a visual inspection of the building. The process involves filling out a special form based on the data obtained, while the inspection is carried out in a short time. In the process of analyzing the literature, the methods of visual assessment of buildings located in seismically active areas of different countries were considered. Such approaches are widely used around the world, in particular in the United States, Switzerland, New Zealand, India, and Turkey.

An analysis of international experience allows us to classify existing methods for assessing the seismic resistance of buildings and structures into three main groups: visual, instrumental and numerical. Visual methods, or methods of expert assessment, are based on the analysis of the condition of the structural elements of buildings and their relative position. Experts use approved methods to determine the compliance of load-bearing structures with the requirements of regulatory documents. Based on the data obtained, conclusions are drawn on the level of seismic resistance of the facility and recommendations for further operation or the need for a more detailed examination.

Instrumental methods involve determining the characteristics of buildings that affect their technical condition using specialized instruments. Many studies present methods for assessing the seismic resistance and stability of structures using mobile diagnostic systems. This approach is based on determining the natural vibration frequencies of buildings using dynamic analysis methods. V. Bolotin, N. Esenina, I. Sitnikov, A. Isaikin, G. Shablinsky, D. Zubkov, G. Nigmatov, A. Shakhramanyan, D. Glavinsky, and S. Savin made a significant contribution to the development of this field.

Numerical modeling methods include several approaches, among which the most common are modal analysis of the response spectrum and nonlinear static calculation methods. These methods are being actively developed by Ukrainian scientists V. S. Dorofeev, Y. I. Nemchinov, V. A. Grishin, V. V. Kulyabko, S. M. Safargaliev, K. V. Yehupov, M. G. Marienkov, O. V. Kichaeva, A. K. Khavkin, and foreign researchers J. M. Eisenberg, O. V. Mkrtichev, Peter Faifar, and others.

The **second section** presents the methodology of laboratory research. Since the existing housing stock of Ukraine, including brick masonry buildings in seismic areas, is mostly built according to Soviet-era series, fragments of brick walls of different types were taken as the basis for laboratory research, based on the 87th typical series for the Odesa region. The first step in creating the fragments was to select the composition of the cement-limestone mortar to determine the brand of mortar that corresponds to the series. The second stage was to determine the actual brand of brick and compare it with the one declared by the manufacturers. The third stage involved forming and equipping three types of brick wall fragments: solid (without an opening), with a window opening, and with a door opening - 2 fragments each. Fragments measuring 1440 x 1420 mm were made with a scale of 1:2 relative to the actual dimensions of the walls, equipped with clock-type indicators and deflectometers. The tests were conducted in 2 stages. The first stage involved applying vertical static design loads in increments of 10% until the design values were reached. The second stage was the application of loads arising from seismic impacts. A distinctive feature of this study is the phased application of loads, in which both vertical and horizontal forces were applied to the fragments simultaneously. This approach made it possible to determine the bearing

capacity of the structure, its deformations, and the peculiarities of crack development caused by seismic loads.

The **third section** presents the results of laboratory tests.

Based on the test results, the proportions of the main components of the mortar were selected: binder (slag Portland cement grade M400), slaked lime, aggregate (sand), and water. Thanks to the optimal ratio of components, we managed to achieve a mortar grade of M50, which corresponds to the selected series.

The test results of the brick samples showed that the brands declared by the manufacturer do not always correspond to the actual ones. For example, the first manufacturer's brick samples corresponded to the declared M100 brand in terms of compressive strength, but did not correspond significantly to the bending strength. Samples from the second manufacturer corresponded to the declared M100 brand in terms of compressive and bending strength.

Analyzing the results of laboratory tests of brick wall fragments, it was found that the sample without a hole has a bearing capacity under vertical static and seismic loads of 255 kN of vertical load and 147 kN of horizontal load, with a skew of 12,16 mm.

According to the results of laboratory tests of a brick wall fragment with a window opening under vertical static and seismic impact, the sample was destroyed at the 22nd load stage, which is equivalent to 239.8 kN of vertical load and 80 kN of horizontal load, with a maximum skew of 13,38 mm.

The test results of a brick wall fragment with a doorway showed that the sample failure occurred at the 18th load stage, which is equivalent to 231,5 kN of vertical load and 51,5 kN of horizontal load, with a maximum deflection of 7,45 mm.

The **four section** presents the results of numerical studies of the seismic resistance of a brickwork building and its fragments, taking into account the configuration of openings. The calculations were performed in the common software package LIRA CAD, due to the fact that the results of the dissertation will be widely used in design practice in the future. Given the further modeling of buildings as a whole, it was decided to abandon micromodeling approaches (when separate elements model the work of bricks and separate elements model the work of mortar) when modeling fragments. Therefore, in this thesis, the material model was adopted as a homogenized

nonlinear anisotropic macromodel. The parameters of the numerical model of the masonry material were calculated. The key points that are taken into account when setting the stress/strain relationship for the masonry material are

- tension of the masonry is described by the work of the masonry tensile model in the horizontal direction;
- compression of masonry up to the point of masonry failure is described by the parabola of the masonry model's work in compression in the vertical direction.
- The residual strength point corresponds to the curve of the masonry model in the horizontal direction.

To evaluate the relevance of the selected model to the masonry material for further calculations, numerical simulations of the laboratory tests of the samples were performed. The results showed a good correspondence of both the magnitude and the nature of the distortions of the samples at the level of the design earthquake.

The results of the numerical modeling of the brick masonry building were calculated using two methods: spectral and nonlinear static. In the developed basic model (according to a typical series of five-story residential buildings), the window sill blocks were sequentially dismantled with the transformation of window openings into doorways along the entire wall of the 1st floor to assess their impact on the seismic resistance of the building.

The results of calculations by the spectral method showed that the above change in the configuration of the openings along the entire length of the wall does not actually affect the periods of oscillations of the building, the difference is 0.8%.

The results of the nonlinear static calculation revealed an increase in the number of destroyed elements with a larger number of reconfigured openings and a significant redistribution of internal forces: the appearance of new openings on one side of the building increases the concentration of forces on the opposite wall.

The **fifth section** contains the results of testing the world's VESR methods and the addition of the existing visual assessment methodology with reference to brick masonry buildings.

The testing of global methods of visual assessment of seismic resistance has shown that the same building has different results according to different methods. Thus,

according to the American FEMA 154 seismic resistance assessment methodology, the building is not seismically stable and requires further numerical studies. According to the New Zealand visual seismic assessment methodology, the building is classified as Class C, which is potentially earthquake hazardous but does not require further seismic assessment. According to the Swiss VESR methodology, the building is not a priority building for further seismic resistance assessment. The discrepancy between the results indicates the need to develop a domestic methodology taking into account local construction features and the regulatory framework.

The results of laboratory and numerical studies made it possible to supplement the existing RVS methodology for brickwork buildings, which was tested on a building in Odesa. According to the results of the testing, it was found that the building is seismically hazardous due to the appearance of new openings in the load-bearing walls and requires the next level of seismic resistance assessment.

The general conclusions emphasize the importance of the problem solved in the thesis and present the key results of the research.

The results obtained in the research work have been implemented in the design activities of Kapitel-M PE, in the design and construction of ZARS LLC, and in the technical inspection and subsequent design of the Infrastructure Restoration and Development Service in Odesa Oblast. The results have also been implemented in the educational process at the Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture.

Keywords: seismic resistance of buildings, brick masonry buildings, visual assessment of seismic resistance, impact of openings.