

АНОТАЦІЯ

Фесун І. К. Скінченно-елементне моделювання процесу прогресуючого обвалення будівель і споруд в просторово-нелінійній постановці. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 192 Будівництво та цивільна інженерія. – Київський національний університет будівництва і архітектури, Міністерство освіти і науки України, Київ, 2026.

Сучасні умови забезпечення живучості будівель і споруд характеризуються новими викликами, що зумовлені зростанням ризиків виникнення надзвичайних ситуацій воєнного та техногенного характеру. Особливу загрозу становлять локальні руйнування несучих елементів внаслідок вибухових або ударних впливів, що можуть призвести до прогресуючого обвалення будівель і споруд. Випадки прогресуючого обвалення будівель і споруд з величезною кількістю людських і матеріальних втрат зафіксовані по всьому світу, а з початком повномасштабного вторгнення в Україні явище набуло масового характеру. Початкові локальні пошкодження значної частини будівель і споруд спричинили їхнє повне руйнування за принципом ланцюгової реакції.

Існуючі підходи щодо забезпечення стійкості до прогресуючого обвалення, зокрема ті, що закладені в чинних нормативних документах, часто базуються на спрощених припущеннях, які не повною мірою відображають складну фізику процесу. Це створює протиріччя між теоретичними прогнозами та фактичною живучістю будівель та споруд.

Метою дослідження є удосконалення на основі методу скінченних елементів методик розрахунку на стійкість до прогресуючого обвалення будівель і споруд. **Наукова новизна** полягає у створенні на основі методу скінченних елементів ефективної методики чисельного моделювання процесу ПО будівель і споруд із урахуванням причини, що призвела до руйнуючої події (аварійного впливу). **Практична значимість** полягає в удосконаленні методології чисельного розрахунку на стійкість до ПО будівель і споруд. Запропоновані підходи дозволяють відтворити розрахункові схеми, що максимально відповідають

реальним сценаріям аварійних впливів. Результати дослідження можуть бути використані під час проєктування, виконання технічного обстеження, розробки та актуалізації будівельних нормативних документів.

У першому розділі представлено результати комплексного аналізу області дослідження прогресуючого обвалення. Розглянуто результати досліджень забезпечення живучості будівельних об'єктів під час прогресуючого обвалення, в тому числі огляд світових випадків прогресуючого обвалення, що відображені у працях таких науковців: У. Староссека, Б. Еллінгвуда, Д. Адама, Д. Каредди, Д. Рассела, Н. Елкаді, Г. Лі, А. Перельмутера, С. Фіалка, В. Першакова, М. Барабаш та інших.

Особливу увагу в розділі приділено критичному аналізу державної та закордонних нормативних баз. Порівняно вимоги щодо забезпечення стійкості до прогресуючого обвалення, зокрема: мінімальні необхідні характеристики будівель на стадії проєктування, прийняті підходи до зменшення вірогідності виникнення цього явища, основні критерії визначення прогресуючого обвалення, параметри моделювання за методом раптового видалення несучої конструкції.

В результаті комплексного аналізу сформовано проблематику сучасних підходів до забезпечення стійкості до прогресуючого обвалення, зокрема:

- принцип незалежності від типу загрози традиційного чисельного моделювання прогресуючого обвалення не повною мірою відображає реальні сценарії обвалення;
- рекомендовані параметри моделювання прогресуючого обвалення не повною мірою співпадають із даними статистичної обробки світових випадків;
- прогалини в забезпеченні нормативних баз, у тому числі України, щодо розрахунків на стійкість до прогресуючого обвалення, що породжує різноманітність вихідних даних і відповідно результатів.

У другому розділі викладено методологічні засади проведення чисельних розрахунків на стійкість до прогресуючого обвалення на основі методу скінченних елементів із припущеннями фізичної та геометричної нелінійностей. Розглянуто моделі динамічного зміцнення матеріалів, що ґрунтуються на припущенні:

зростання швидкості деформування призводить підвищення механічних характеристик.

Запропоновано розширення традиційного підходу визначення стійкості до прогресуючого обвалення за рахунок розгляду більш складних та реалістичних сценаріїв пошкоджень. Вперше представлено підхід моделювання раптового видалення конструкцій із врахуванням руйнувань та пошкоджень суміжних конструкцій, що з'явилися після аварійного впливу. Це дозволяє не розглядати безпосередньо причину аварійного впливу, а сфокусуватися на наслідках цього впливу, а саме – на факті руйнування одного та/або декількох конструкцій та/або пошкодженням суміжних конструкцій.

У третьому розділі представлено результати параметричного дослідження чисельного моделювання процесу прогресуючого обвалення. За першим етапом виконано пошук оптимальних параметрів традиційного чисельного моделювання процесу прогресуючого обвалення шляхом співставлення даних експериментальних досліджень та різноманітних ітераційних результатів чисельного моделювання. До верифікації обрано 3 динамічних експериментальних дослідження прогресуючого обвалення, описаних у найцитованіших технічних журналах світу: тестова задача №1 – залізобетонна плита на 6 опорах, тестова задача №2 – повномасштабний 2-поверховий залізобетонний каркас на 9 опорах, тестова задача №3 – серія із трьох 2-поверхових сталевих рам. Кожна з трьох обраних тестових задач відрізняється між собою не лише матеріалом (залізобетон, сталь), конструктивною схемою, постановкою задачі (плоска чи просторова) та місцем видалення опори, але й, що ключове, наявністю у вихідних даних певних параметрів, що є визначальними під час нелінійного аналізу. Це дозволило сфокусувати дослідження на різних аспектах моделювання. За результатами пошуку встановлено, що:

- при традиційному моделюванні прогресуючого обвалення найбільш оптимальним є динамічний метод раптового видалення конструкцій із урахуванням демпфування по Релею та динамічного зміцнення матеріалів;

- забезпечення механічного опору та стійкості, визначене розрахунком при усталеній розрахунковій ситуації, є визначальною умовою для оцінки стійкості до прогресуючого обвалення;
- запропонована (стержнево-оболонкова) модель, в якій оболонкові скінченні елементи застосовуються лише у зонах, де очікується розвиток пластичних деформацій та можлива втрата місцевої стійкості, виявилась ефективним інструментом для практичних розрахунків, забезпечуючи високу точність та скорочуючи обчислювальні ресурси;
- настанови щодо розрахунків (квазістатичний метод, динамічне зміцнення матеріалів, граничні деформації), регламентовані чинними нормативними документами, не дали прийнятних результатів для оцінки стійкості до прогресуючого обвалення.

За другим етапом виконано моделювання прогресуючого обвалення тестових задач із врахуванням пошкоджень суміжних конструкцій, де підтверджено необхідність врахування не лише факту одиночного видалення елемента, але й стану пошкодження суміжних конструкцій.

Вперше представлено удосконалену методику динамічного розрахунку будівель і споруд на стійкість до прогресуючого обвалення. Методика базується на динамічному методі (пряме інтегрування рівнянь руху за часом) та складається з шести послідовних етапів.

У четвертому розділі представлено результати апробації створеної методики розрахунку на стійкість до прогресуючого обвалення із врахуванням причини, що призвела до руйнуючої події (аварійного впливу) на прикладі реального об'єкта, що зазнав локальних руйнувань внаслідок аварійного впливу. Дослідження було спрямоване на порівняльний аналіз результатів моделювання за вимогами норм, результатів моделювання розробленої методики та фактичного стану конструкцій після аварії.

Результати нормативного моделювання однозначно вказують на неминуче обвалення ділянки покриття через руйнування болтових з'єднань. Квазістатичний аналіз виявив перевищення зусиль над граничним опором у вузлах у 2.2 рази,

а нелінійний динамічний аналіз – у 3.3 рази. Однак, обстеження будівлі після влучання БпЛА показало, що обвалення не відбулося, попри видалення частини балки. Така розбіжність між розрахунком та фактичним станом конструкцій демонструє недостатність методу «чистого одиночного видалення» елементів. Це підтверджує необхідність врахування реальної причини аварійного впливу та пошкоджень суміжних конструкцій, що дозволить максимально наблизити чисельну модель до реальної ситуації.

На об'єкті вибуховою хвилею повністю зруйновано більше половини покрівлі кутової зони та весь контур стінових сендвіч-панелей у межах кутової зони. Така зміна фізичного стану серйозно коригує розрахункову модель: руйнування огорожувальних конструкцій миттєво ліквідовує навантаження, що передавалося від них на сталевий каркас. Врахування фактору розвантаження внаслідок руйнування огорожувальних конструкцій вибуховою хвилею призвело до кардинальної зміни динамічної відповіді системи, порівняно з нормативним сценарієм. Отримані результати нелінійного динамічного аналізу свідчать про суттєве зниження амплітуди коливань та внутрішніх зусиль у критичних перерізах. Розрахунок вузла, виконаний на дію оновлених внутрішніх зусиль, підтвердив збереження цілісності з'єднання.

У загальних висновках представлено основні результати, отримані під час дисертаційного дослідження. Робота відкриває перспективи для подальших досліджень у області прогресуючого обвалення.

Ключові слова: прогресуюче обвалення, стійкість, метод скінченних елементів, моделювання, нелінійність, раптове видалення, динамічний метод, квазістатичний метод, аварійний вплив, пошкодження, руйнування.

ABSTRACT

Fesun, I. K. Finite-element modeling of the progressive collapse of buildings and structures in a spatially nonlinear formulation. – Qualifying scientific thesis in manuscript form.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in the specialty 192 Construction and Civil Engineering. – Kyiv National University of Construction and Architecture, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2026.

Modern conditions for ensuring the survivability of buildings and structures are characterized by new challenges caused by the growing risks of military and technogenic emergencies. Localized destruction of load-bearing elements due to explosive or impact forces poses a particular threat, as it can lead to the progressive collapse of buildings and structures. Cases of progressive collapse of buildings and structures resulting in massive human and material losses have been recorded worldwide, and with the onset of a full-scale invasion of Ukraine, this phenomenon has become widespread. Initial localized damage to a significant portion of buildings and structures led to their complete collapse through a chain reaction.

Existing approaches to ensuring resistance to progressive collapse, particularly those laid out in current regulatory documents, are often based on simplified assumptions that do not fully reflect the complex physics of the process. This creates a discrepancy between theoretical predictions and the actual survivability of buildings and structures.

The aim of the study is to improve, based on the finite element method, the calculation methods for resistance to progressive collapse of buildings and structures. **The scientific novelty** consists in the creation, based on the finite element method, of an effective methodology for numerical modeling of the progressive collapse of buildings and structures, taking into account the cause that led to the destructive event (emergency impact). **The practical significance** consists in the improvement of the methodology for numerical calculation of the resistance to progressive collapse of buildings and structures. The proposed approaches allow for the creation of calculation schemes that most closely correspond to real-world scenarios of accidental impacts. The research results can be used during design, technical inspection, and the development and updating of building codes.

The first chapter presents the results of a comprehensive analysis of the research area of progressive collapse. The results of studies on ensuring the survivability of building structures during progressive collapse are reviewed, including a review of global cases of progressive collapse documented in the works of the following researchers: U. Starossek, B. Ellingwood, J. Adam, G. Caredda, J. Russell, N. Elkady, G. Li, A. Perelmuter, S. Fialko, V. Pershakov, M. Barabash, and others.

Particular attention in this chapter is devoted to a critical analysis of domestic and foreign regulatory standards. The requirements for ensuring resistance to progressive collapse are compared, specifically: the minimum necessary characteristics of buildings at the design stage, accepted approaches to reducing the probability of this event, the main criteria for determining progressive collapse, and modeling parameters using the sudden removal of load-bearing structures method.

As a result of a comprehensive analysis, the issues surrounding modern approaches to ensuring resistance to progressive collapse have been identified, specifically:

- the principle of independence from the type of threat in traditional numerical modeling of progressive collapse does not fully reflect real-world collapse scenarios;
- the recommended modeling parameters for progressive collapse do not fully correspond to the statistical data from global cases;
- gaps in regulatory standards, including those in Ukraine, regarding calculations for resistance to progressive collapse, which leads to a variety of input data and, consequently, results.

The second chapter presents the methodological foundations for performing numerical calculations of resistance to progressive collapse based on the finite element method, incorporating assumptions of physical and geometric nonlinearities. Models of dynamic strengthening of materials are considered, based on the assumption that an increase in strain rate leads to an improvement in mechanical properties.

An extension of the traditional approach to determining resistance to progressive collapse is proposed by considering more complex and realistic damage scenarios. For the first time, an approach to modeling the sudden removal of structures is presented,

taking into account the destruction and damage to adjacent structures that occurred after the emergency impact. This allows one to focus not directly on the cause of the accidental impact, but on the consequences of this impact, namely the fact of the failure of one and/or several structures and/or the damage to adjacent structures.

The third chapter presents the results of a parametric study of numerical modeling of the progressive collapse process. In the first stage, a search was conducted for the optimal parameters of traditional numerical modeling of the progressive collapse process by comparing data from experimental studies with various iterative results of numerical modeling. Three dynamic experimental studies of progressive collapse, described in the world's most cited technical journals, were selected for verification: test case No. 1 – a reinforced concrete slab on 6 supports, test case No. 2 – a full-scale 2-story reinforced concrete frame on 9 supports, test case No. 3 – a series of three 2-story steel frames. Each of the three selected test cases differs not only in material (reinforced concrete, steel), structural configuration, problem formulation (planar or spatial), and the location of support removal, but also, crucially, in the presence of certain parameters in the input data that are critical during nonlinear analysis. This allowed the research to focus on various aspects of modeling. The results of the study established that:

- in traditional modeling of progressive collapse, the most optimal method is the dynamic method of sudden removal of structures, taking into account Rayleigh damping and dynamic strengthening of materials;
- ensuring mechanical resistance and stability, determined by calculation under a steady-state design condition, is a decisive condition for assessing resistance to progressive collapse;
- the proposed (rod-shell) model, in which shell finite elements are applied only in zones where plastic deformations are expected to develop and local stability may be lost, has proven to be an effective tool for practical calculations, ensuring high accuracy and reducing computational resources;
- calculation guidelines (quasi-static method, dynamic material strengthening, limit deformations), as regulated by current standards, did not yield acceptable results for assessing resistance to progressive collapse.

In the second stage, modeling of progressive collapse for test cases was performed, taking into account damage to adjacent structures, which confirmed the need to account not only for the removal of a single element but also for the damage state of adjacent structures.

An improved methodology for the dynamic calculation of buildings and structures for resistance to progressive collapse is presented for the first time. The methodology is based on the dynamic method (direct integration of the equations of motion over time) and consists of six sequential stages.

The fourth chapter presents the results of testing the developed method for calculating resistance to progressive collapse, taking into account the cause that led to the destructive event (emergency impact), using the example of a real structure that suffered local damage as a result of an emergency impact. The study was aimed at a comparative analysis of the results of modeling according to code requirements, the results of modeling using the developed methodology, and the actual condition of the structures after the accident.

The results of code-based modeling clearly indicate the inevitable collapse of a section of the roof due to the failure of bolted connections. Quasi-static analysis revealed that the forces exceeded the ultimate resistance at the joints by a factor of 2.2, while nonlinear dynamic analysis showed a factor of 3.3. However, an inspection of the building after the UAV strike revealed that no collapse occurred, despite the removal of part of the beam. This discrepancy between the calculation and the actual condition of the structures demonstrates the inadequacy of the “pure single-element removal” method. This confirms the need to account for the actual cause of the impact and damage to adjacent structures, which will allow the numerical model to be brought as close as possible to the real situation.

At the site, the blast wave completely destroyed more than half of the roof in the corner area and the entire perimeter of the wall sandwich panels within the corner area. Such a change in the physical state significantly alters the computational model: the destruction of the building envelope structures instantly eliminates the load that was transferred from them to the steel frame. Accounting for the unloading factor resulting

from the destruction of the building envelope by the blast wave led to a radical change in the system's dynamic response compared to the standard scenario. The results of the nonlinear dynamic analysis indicate a significant reduction in the amplitude of vibrations and internal forces in critical cross-sections. The calculation of the joint, performed under the action of the updated internal forces, confirmed the preservation of the joint's integrity.

The general conclusions present the main results obtained during the dissertation research. The work opens up prospects for further research in the field of progressive collapse.

Keywords: progressive collapse, stability, finite element method, modeling, nonlinearity, sudden removal, dynamic method, quasi-static method, emergency impact, damage, failure.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у науковому виданні, включеному до переліку наукових фахових видань категорії «А», яке цитується у реферативній базі Web of Science

1. Вабіщевич М. О., Фесун І. К. Підходи щодо забезпечення стійкості до прогресуючого обвалення будівель та споруд. Сучасний стан та перспективи. *Опір матеріалів і теорія споруд*. 2023. № 110. С. 256–263. URL: <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2023.110.256-263>.
Особисто здобувачем виконано огляд прийнятих підходів щодо забезпечення стійкості до прогресуючого обвалення будівель і споруд у світі та в Україні, зокрема приділено увагу нормативного забезпечення щодо стійкості до прогресуючого обвалення (Web of Science).
2. Дослідження прогресуючого обвалення сталевих конструкцій із урахуванням фізичної нелінійності / М. О. Вабіщевич та ін. *Опір матеріалів і теорія споруд*. 2024. № 113. С. 81–88. URL: <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2024.113.81-88>.
Особисто здобувачем комплексно проаналізовано проблематику дослідження явища прогресуючого обвалення, визначено сучасний етап дослідження, визначено ключові питання під час моделювання раптового видалення конструкцій, наведено результати дослідження раптового обвалення сталевих конструкцій без урахування та з урахуванням фізичної нелінійності (Web of Science).

3. Вабіщевич М. О., Фесун І. К. Про обстеження індивідуальних житлових будинків, що були пошкоджені та зруйновані внаслідок бойових дій. *Управління розвитком складних систем*. 2023. № 53. С. 127–134. URL: <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2023.53.127-134>.

Особисто здобувачем на основі даних технічних обстежень будівель, що зазнали пошкоджень або були зруйновані внаслідок бойових дій, виконана комплексна оцінка технічного стану несучих конструкцій та будівель в цілому, причини пошкоджень, рекомендацій щодо подальшого відновлення.

4. Fesun I. K., Vabishchevich M. O., Lukashevych D. Y. Analysis of foreign experience in research cases of progressive collapse of buildings and structures. *Modern construction and architecture*. 2024. No. 10. P. 45–53. URL: <https://doi.org/10.31650/2786-6696-2024-10-45-53>

Особисто здобувачем виконано аналіз явища прогресуючого обвалення будівель і споруд на основі досвіду закордонних визначних випадків. В результаті аналізу розглянуто: причини ініціації прогресуючого обвалення, ступінь непропорційності прогресуючого обвалення, види прогресуючого обвалення, конструктивні особливості випадків прогресуючого обвалення.

5. Фесун І. К. Дослідження світового досвіду із забезпечення нормативної бази для розрахунків стійкості будівель до прогресуючого обвалення. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*. 2024. № 210. С. 102–110. URL: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.210.2024.320888>.

6. Фесун І., Ковальчук А., Літнарівч Є. Порівняння конструктивних особливостей заглиблених та незаглиблених споруд подвійного призначення на основі досвіду проектування. *Основи та фундаменти*. 2025. № 50. С. 308–315. URL: <https://doi.org/10.32347/0475-1132.50.2025.308-315>.

Особисто здобувачем виконано комплексний аналіз об'ємно-планувальних та конструктивних рішень споруд подвійного призначення, особливостей розрахунків та конструювання.

7. Фесун І. К. Верифікація чисельних моделей прогресуючого обвалення сталевих рам за даними експериментального дослідження. *Науковий вісник будівництва*. 2025. № 113. С. 176–186. URL: <https://doi.org/10.33042/2311-7257.2025.113.1.21>

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

8. Фесун І. К., Вабіщевич М. О. Конструктивні особливості існуючої малоповерхової житлової забудови Макарівської територіальної громади, Бучанського району, Київської області. *International scientific-practical conference of young scientists "Build-Master-Class-2022"*: зб. тез міжнар. науково-практ. конф. молодих вчен., м. Київ, 30 листоп. – 2 груд. 2022 р. С. 137–138.
9. Фесун І. К., Вабіщевич М. О. Аналіз сучасного стану нормативної бази України щодо стійкості до прогресуючого обвалення будівель і споруд. *IV Міжнародна науково-практична конференція «Енергоощадні машини і технології»*: матеріали IV Міжнар. науково-практ. конф., м. Київ, 23–25 трав. 2023 р. С. 131-133.
10. Фесун І. К., Бурківський М. М. Про використання запасів несучої здатності конструкцій при розрахунку на прогресуюче обвалення будівель. *Актуальні проблеми інженерної механіки*: Матеріали X Міжнар. науково-техн. конф. за заг. ред. М.Г. Сур'янінова., м. Одеса, 5–7 черв. 2024 р. С. 167–169.
11. Вабіщевич М. О., Фесун І. К. Дослідження динамічного деформування сталевих конструкцій при раптовому обваленні з урахуванням фізичної нелінійності. *Міжнародна наукова конференція «Механіка: сучасність і перспективи – 2024»*: Матеріали міжнар. наук. конф., м. Київ, 7–11 жовт. 2024 р. С. 324–326.
12. Фесун І. К., Вабіщевич М. О. Аналіз сучасного стану та перспективи дослідження щодо забезпечення стійкості до прогресуючого обвалення. *Науково-технічний симпозіум «Актуальні проблеми розрахунків будівельних конструкцій»*: Тези доп., м. Київ, 12 груд. 2024 р. С. 63–67.

13. Вабіщевич М., Фесун І., Лукашевич Д. Досвід використання ПК SCAD при проектуванні споруд подвійного призначення. *V міжнародна науково-практична конференція "Будівлі та споруди спеціального призначення: сучасні матеріали та конструкції"* : робоча програма та тези доп., м. Київ, 14–16 трав. 2025 р. С. 48–49. URL: <https://doi.org/10.59647/978-617-8633-07-3/1>.
14. Вабіщевич М. О., Фесун І. К. Підвищення прогностуючої точності чисельного моделювання прогресуючого обвалення шляхом верифікації за експериментальними випробуваннями. *CIDS 2025*, м. Київ, 30–31 жовт. 2025 р. С. 57–60. URL: https://scadsoft.com/Seminar/CIDS_Kyiv_2025.pdf.
15. Фесун І. К., Вабіщевич М. О. Удосконалення моделювання прогресуючого обвалення об'єкта будівництва на прикладі реального аварійного впливу. *Тези доповідей Міжнародної наукової конференції «Актуальні проблеми механіки і машинознавства – 2026»*, 26–28 трав. 2026 р. Київ, 2026. С. 137–138. URL: https://www.ipp.kiev.ua/conference_2026/abstracts_apmme_2026.pdf?v=1.01.