

УДК 624.042.4+624.014.2+624.04

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.241225.65.1210

АНАЛІЗ СТІЙКОСТІ БУДІВЕЛЬ ІЗ РІЗНИМИ КОНСТРУКТИВНИМИ СХЕМАМИ ДО ПРОГРЕСУЮЧОГО ОБВАЛЕННЯ ВНАСЛІДОК РАКЕТНИХ УДАРІВ

ДАВИДОВ І. І.¹, канд. техн. наук, доц.,

ЧАБАН В. П.², канд. техн. наук, доц.,

КОВТУН-ГОРБАЧОВА Т. А.^{3,*}, канд. техн. наук, доц.,

КОВТУН К. А.⁴, аспір.

¹ Кафедра металевих, дерев'яних і пластмасових конструкцій, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 46-98-62, e-mail: i.i.davydov@ust.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-7687-2241

² Кафедра металевих, дерев'яних і пластмасових конструкцій, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 46-98-62, e-mail: v.p.chaban@ust.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-0217-5504

^{3*} Кафедра металевих, дерев'яних і пластмасових конструкцій, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 46-98-62, e-mail: t.a.kovtun_horbachova@ust.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-0948-1299

⁴ Кафедра технології будівельного виробництва та геодезії, Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпро, Україна, тел. +38 (0563) 73-15-44, e-mail: t.a.kovtun_horbachova@ust.edu.ua

Анотація. Узагальнено результати інструментальних обстежень багатопверхових будівель цивільного призначення з каркасними та комбінованими конструктивними схемами, які пошкоджено внаслідок вибухового навантаження. Проведено чисельне моделювання процесу руйнування у квазістатичних та динамічних постановках. Сформульовано критерій поширення прогресуючого обвалення у вигляді порівняння вивільненої потенціальної енергії та енергії, необхідної для руйнування сусідніх елементів. Проведено кількісну оцінку енергетичного балансу для окремих ділянок конструкцій будівель з каркасними та комбінованими конструктивними схемами. **Мета статті** – аналіз межі поширення прогресуючого обвалення багатопверхових будівель цивільного призначення з каркасними та комбінованими конструктивними схемами після дії вибухового навантаження з урахуванням енергетичних характеристик системи. **Висновки.** Розроблено узагальнений алгоритм оцінки ризику поширення прогресуючого обвалення на основі енергетичного підходу. Встановлено зв'язок між типом конструктивної схеми та здатністю системи локалізувати руйнування. Будівлі зі змішаними схемами (вбудований каркас у поєднанні з несучими стінами) мають вищу енергопоглинаючу здатність за рахунок внутрішнього сухого тертя та багаточислової структури заповнення, що істотно знижує ризик повного прогресуючого обвалення.

Ключові слова: прогресуюче обвалення; енергетичний баланс; вибухове навантаження; багатопверхова будівля; чисельне моделювання; конструктивна схема; каркасна конструктивна схема; комбінована конструктивна схема; енергопоглинання

ANALYSIS OF THE STABILITY OF BUILDINGS WITH DIFFERENT STRUCTURAL SYSTEMS AGAINST PROGRESSIVE COLLAPSE DUE TO MISSILE STRIKES

DAVYDOV I.I.¹, Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.,

CHABAN V.P.², Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.,

KOVTUN-HORBACHOVA T.A.^{3*}, Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.,

KOVTUN K.A.⁴, Postgrad. Stud.

¹ Department of Metal, Wooden and Plastic Structures, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (0562) 46-98-62, e-mail: i.i.davydov@ust.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-7687-2241

² Department of Metal, Wooden and Plastic Structures, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (0562) 46-98-62, e-mail: y.p.chaban@ust.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-0217-5504

^{3*} Department of Metal, Wooden and Plastic Structures, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (0562) 46-98-62, e-mail: t.a.kovtun_horbachova@ust.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-0948-1299

⁴ Department of Construction Technology and Geodesy, Ukrainian State University of Science and Technologies, 2, Lazaryana St., Dnipro, 49010, Ukraine, tel. +38 (0563) 73-15-44, e-mail: t.a.kovtun_horbachova@ust.edu.ua

Abstract. In the mechanics of deformable solids and in the support of materials, as well as in the mechanics of composite materials, the main simple types of stress-strain state are used such as: pure tensile, pure compression and pure shear. In the case of pure tension (compression), in addition to longitudinal deformations (deformations along the direction of uniaxial stress), transverse deformations arise (deformations are normal to the load axis). With a pure shear, normal deformations to the shear planes are not taken into account. However, as shown in Part 1 and Part 2 of inelastic clean shear studies [10], in homogeneous materials with different resistance of tension and compression there are deformations normal to the displacement planes. In composite materials, such studies have not been conducted. The solution of tasks of this type in the mechanics of a deformable solid and in the support of materials, as well as in the mechanics of composite materials is not provided. **Goal.** On the basis of the methods and conditions of the mechanics of deformable solids and the resistance of materials, as well as earlier studies on inelastic clean shear [10], to determine the effect of linear continuous reinforcement of a composite on its deformation properties under pure shear. **Conclusions.** The stiffness of a composite at displacement (with a matrix having different plastic properties under tension and compression) beyond the elasticity of the matrix increases with increasing stiffness of the reinforcing elements even if the reinforcing elements are not capable of accepting the shearing forces. In studies of a stress-strain state in equations and systems of equations of equilibrium of effort it is necessary to take into account the deformation properties of materials both in tension and compression.

Keywords: *progressive collapse; energy balance; explosive loading; multi-storey building; numerical modeling; structural system; frame system; combined system; energy absorption*

Постановка проблеми. В умовах ракетних ударів по будівлях та спорудах України дуже актуальним є завдання уточнення аналізу стійкості будівель до екстремальних впливів, зокрема до прогресуючого обвалення. Такі руйнування, спричинені локальним пошкодженням одного елемента, можуть призвести до каскадного обвалення всієї споруди.

Національні стандарти [1–12] мають досить загальний характер, через що їх практичне застосування є обмеженим. По аналогії з Єврокодами в ДБН [1] методи зниження ризиків і запобігання прогресуючому обваленню залежать від класу наслідків (СС1-СС3). Необхідно провести оцінку загальної стійкості будівлі, щоб локальні пошкодження не призводили до повного руйнування та втрати цілісності будівлі загалом. Але граничні умови конструкцій не регламентуються.

У розділі 11 ДСТУ [11] наведено приклади розрахункових схем і типових деформацій об'єктів в залежності від місця розташування позапроектних дій, очагов ураження при позаштатних ситуаціях або військових діях.

Детальні рекомендації здебільшого стосуються лише висотних будівель з залізобетонними конструкціями [2]. Наприклад, для будівель з сталевим каркасом рекомендації вже відсутні.

Видання спеціалізованого ДСТУ 9294:2024 «Розрахунок будівель на стійкість до прогресуючого (непропорційного) обвалення» планується у 2025р.

Європейські норми [13–15] детальніше охоплюють дану проблему. При проектуванні конструкцій можуть бути застосовані як ймовірні сценарії ризиків (наприклад, вибухи, зіткнення), так і загальні вимоги до стійкості будівлі незалежно від типу загрози. Непропорційність аналізується на основі співвідношення між кінцевими й початковими збитками, незалежно від природи початкової події [14; 15]. Одним із основних підходів, що використовуються у Єврокодах [13–15], є проектування так званих ключових елементів. Це елементи конструкції, які здатні витримувати значні навантаження навіть у випадку втрати сусідніх частин. Окрім цього, передбачається застосування зв'язків між

різними елементами будівлі, а також резервування для забезпечення альтернативних шляхів навантаження, щоб уникнути повного обвалення у разі локальних пошкоджень.

Однак дотримання вказівок [13–15] може бути недостатнім для забезпечення стійкості конструкцій до прогресуючого обвалення. Наприклад, відсутні вимоги щодо певних типів процедур аналізу для споруд підвищеного ризику, таких як будівлі класу наслідків СС3. Незважаючи на те, що у [13–15] наведені вказівки щодо оцінки динамічних ударних навантажень або еквівалентного статичного навантаження для різних сценаріїв, комплексний метод для забезпечення врахування всіх відповідних динамічних ефектів відсутній. Умовне випадкове навантаження 34 кПа, рекомендоване для використання в конструкції ключових елементів, не завжди підходить для більшості випадкових проектних ситуацій.

У американських стандартах [16–24] наведені рекомендації щодо врахування динаміки, наводяться коефіцієнти динамічності, зміни у підходах до оцінки та обмеження величин, пластичних деформацій при врахуванні фізично нелінійної роботи. Подібно до Єврокодів у [19; 20] будівлі відносяться до різних категорій ризику на основі рівня розміщення будівлі та її функції чи критичності.

Вводяться спеціальні коефіцієнти, які коригують навантаження, що діють на конструкцію під час динамічних впливів, таких як вибухи, землетруси або інші раптові події. Ці коефіцієнти допомагають урахувати додаткові ефекти, що виникають під час швидкого розповсюдження руйнувань.

Стандарти містять оновлені методики для більш точного моделювання поведінки конструкції під час прогресуючого обвалення. Зокрема, підходи зосереджені на врахуванні фізично нелінійних процесів, що виникають у матеріалах конструкцій при великих деформаціях або під впливом складних навантажень.

Норми враховують можливість пластичних деформацій, які дозволяють конструкції залишатися стійкою навіть після локальних руйнувань. Однак встановлюються межі таких деформацій, щоб забезпечити збереження структурної цілісності.

Також виконується поєднання норм щодо прогресуючого обвалення та сейсмостійкого будівництва, дано вказівки щодо часу відмови для динамічного методу розрахунку. Використання сейсмостійких технологій сприяє зниженню ймовірності прогресуючого обвалення.

Динамічні методи розрахунку передбачають врахування того, скільки часу потрібно для повного або часткового обвалення елементів конструкції після виникнення критичних навантажень. Це допомагає у прогнозуванні прогресування обвалення та прийнятті необхідних заходів для його зупинки.

Стандарти детально розглядають причини початкової відмови елементів конструкції. Непропорційність розглядається через аналіз першопричин, таких як раптові локальні обвалення, помилки в проектуванні або непередбачені зовнішні чинники (землетруси, вибухи). Непропорційність оцінюється через причини початкової відмови [20; 21] шляхом аналізу сценаріїв видалення різних несучих елементів з конструктивної системи.

У [20] надаються рекомендації щодо врахування поєднання різних типів прогресуючого обвалення. За рекомендаціями [20] можливо незалежно від загроз застосовувати підхід обмеження прогресування початкового пошкодження в конструкціях шляхом розвитку ALP і резервування без врахування прямих причин початкового збою.

На відміну від Єврокодів у [20] надаються детальні вказівки щодо прийнятних методів аналізу, які можуть бути використані інженерами-проектувальниками при дослідженні прогресуючого обвалення. У [20] запропоновані лінійні статичні, нелінійні

статичні і нелінійні динамічні методи аналізу. Лінійний статичний аналіз застосовується до звичайних конструкцій, що не перевищують 10-ти поверхів. Для нерегулярних конструкцій понад 10 поверхів можна застосувати нелінійний динамічний аналіз. Після процесу аналізу розглядаються різні сценарії видалення конструктивних елементів.

Але досі зберігається багато невизначеностей у постановці завдання. Про це свідчить збільшення кількості публікацій на цю тему, протиріччя у існуючих нормативах, а також розробка нових стандартів.

Мета й завдання. У зв'язку з масовими руйнуваннями будівель в Україні внаслідок ракетних ударів 2022–2025 рр., авторами було проведено технічне обстеження пошкоджених споруд з різними конструктивними схемами. Це дозволило отримати дані щодо реальної поведінки конструкцій під дією екстремальних навантажень та здійснити порівняльний аналіз їх стійкості до прогресуючого обвалення.

Метою дослідження є виявлення закономірностей розвитку прогресуючого обвалення в будівлях з різними конструктивними схемами – рамно-зв'язковими, зв'язковими та змішаними каркасно-стіновими – та розробка інженерних підходів до прогнозування і

запобігання їх руйнуванню при надзвичайних ситуаціях. Для досягнення цієї мети ставляться наступні завдання. Виконати узагальнення результатів інструментального обстеження будівель з різними конструктивними схемами для виявлення закономірностей їх руйнування під дією ракетних ударів. Проаналізувати сценарії розвитку прогресуючого обвалення з урахуванням конфігурації несучої системи та характеру початкового пошкодження. Провести чисельне моделювання розвитку прогресуючого обвалення у квазістатичному та динамічному режимах з використанням програмних комплексів SCAD та LIRA-SAPR. Розробити алгоритм прогнозування поширення прогресуючого обвалення на основі енергетичного підходу – шляхом порівняння сумарної енергії руйнування з енергопоглинальною здатністю сусідніх конструктивних елементів.

Виклад матеріалу. Проведемо порівняння різних конструктивних схем багатопверхових будівель цивільного призначення, що належать до класу наслідків (відповідальності) СС2 згідно з ДБН [1]. Аналіз охоплює будівлі, розташовані в сейсмічній зоні, що дозволяє зосередитись на дії ударних та аварійних навантажень, зокрема прогресуючого обвалення внаслідок локальних пошкоджень.



Рис. 1. Схема будівлі № 1, розрахункова модель, типове перекриття

Будівля 1 (рис. 1) приклад будівель з повним залізобетонним каркасом. Будівля 1

збудована та введена в експлуатацію в 1980 рр., виконана за каркасною зв'язковою

схемою з сіткою колон 6×6 м та 3×6 м з повним залізобетонним каркасом згідно з типовою серією ІІІ-04. Просторова жорсткість каркаса забезпечується системою діафрагм жорсткості між колонами у двох напрямках, а також жорсткими дисками перекриттів зі збірних залізобетонних рядових і міжколонних зв'язкових плит. Колони жорстко защемлені у склянках залізобетонних фундаментів та шарнірно з'єднані зі збірними залізобетонними ригелями. Висоти 1-го – 8-го поверхів становлять 4.2 м, технічного 9-го поверху – 3.3 м. Колони основного каркасу мають перетин 0.4×0.4 м по серії ІІІ-04-2. Діафрагми жорсткості каркаса виконані для колон перетином 0.4×0.4 м по серії ІІІ-04-6. Ригелі перекриттів виконані збірними залізобетонними, в опалубці серії ІІІ-04-3 вип. 2. Застосовано плити перекриттів по серії ІІІ-04-4 випуск 1: рядові багатопустотні шириною 0.59 та 1.19 м, довжиною 5.76 м; зв'язкові – шириною 0.89 м та 1.19 м. Зовнішнє стінове огороження виконано зі стінових панелей серії ІІІ-04-5 – стінові панелі виконані легко бетонними та товщину 240 мм.

Внаслідок ракетного удару російської федерації (попадання ракети в рівні верхнього поверху) обвалилася частина плит перекриттів, ригелів каркасу та колон; порушено структуру зв'язкового каркасу; відбулось руйнування стінових панелей та масові ослаблення та деформації вузлів кріплення стінових панелей. Існує небезпека подальшого обвалення конструкцій будівлі, технічний стан будівлі – аварійний (категорія «4») [11].

Класифікувати характер наявного та потенційного обвалення несучих конструкцій будівлі можна як обвалення через нестабільність (Instability collapse) з ознаками змішаного типу (Mixed-Type Failure) [25]. Чисельне моделювання проводилось із урахуванням дії вибухового навантаження, еквівалентного потужності ракети (сила вибуху – 1 000 кН, тривалість імпульсу вибухової хвилі – 0.01–0.05 с, імпульс вибуху – 0.267 кН·с). Аналіз виконано з використанням квазістатичних та

динамічних методів розрахунку, що дозволило змодельовати різні сценарії поширення прогресуючого обвалення. Квазістатичний метод Pull-down (імітується дія залишкових зусиль від зруйнованих елементів – обвалених перекриттів, які передаються вниз через вузли) показав, що найбільш вразливими є середні колони, які сприймають додаткові зусилля. Критичне навантаження на вузол (перекриття + ригель): 140–180 кН, на колону 450–600 кН. При прикладенні еквівалентного навантаження від двох поверхів – втрата несучої здатності колон нижніх поверхів розвивається вертикальний механізм прогресуючого обвалення типу «Domino Effect».

Квазістатичний метод Push-down (поступове прикладення вертикального навантаження, що моделює зростаючу дію маси верхніх конструкцій) показав, що межа руйнування досягається при навантаженні, що перевищує 180–200 % від власного статичного зусилля в ригелях: 250–300 кН, при коефіцієнті динамічності 2 – втрата однієї середньої колони на 1-му та 2-му поверхах спричиняє ланцюгове обвалення, при навантаженні 1.5–1.7 критичного і це приводить до повномасштабного обвалення.

Квазістатичне миттєве видалення елементів (моделюється миттєве зникнення несучих елементів з подальшим перерозподілом зусиль) показало, що втрата однієї центральної колони приводить до локального обвалення ригеля й плити.

Втрата двох колон в одному ряду приводить до горизонтального поширення руйнування по ригелях і приводить до подальшого руйнування суміжних колон. Втрата трьох колон (кутових або по діагоналі) приводить до повного прогресуючого обвалення в межах блоку.

Динамічне моделювання (використано змінне навантаження, що зростає від нуля до повного значення в заданий час: центральна колона – $t_1 = 0.05$ с, дві колони в одному ряду – $t_1 = 0.03$ с, три колони в кутовому блоці – $t_1 = 0.02$ с) показало, що ригелі перевантажуються у 2–3 рази, можливе часткове обвалення, руйнування ригелів

спричиняє обвалення перекриттів і суміжних колон. Відбувається передача імпульсу вгору та вбік, реалізується ефект Domino.

Будівля № 2 представляє конструктивні схеми з неповним вбудованим залізобетонним каркасом, перекриттями по збірним залізобетонним плитам та зовнішніми цегляними несучими стінами

(рис. 2) 1960-х рр. Вузли примикання прогонів до колон – шарнірні. Вузли обпирання колон на фундаменти – рамні. Просторова жорсткість будівлі забезпечується наявністю повздовжніх та поперечних зовнішніх стін, жорсткими вузлами примикання колон до фундаментів та жорсткими дисками перекриттів зі збірних залізобетонних плит.



Рис. 2. Схема будівлі № 2, пошкодження плит перекриття, схеми поперечників крайніх частин та середньої

Внаслідок ракетного удару російської федерації (попадання ракети в рівні покриття середньої частини) зруйновані конструкції покриття та плити перекриття верхнього поверху, виявлено значні пошкодження плит перекриттів під зонами обвалення. Існує загроза подальшого обвалення частини плит перекриття. Технічний стан будівлі – стан не придатний для нормальної експлуатації (категорія стану «3») [11]. Можна класифікувати характер наявного та потенційного обвалення несучих конструкцій будівлі як згортання блискавки (Zipper Collapse) [25] – руйнування конструкцій покриття відбулось у послідовному повздовжньому напрямку. Супутні механізми: вертикальне послідовне руйнування перекриттів (Pancake Collapse) та обвалення через втрату стійкості окремих конструкцій (Instability Collapse). Pulldown (імітація дії обвалених елементів);

навантаження: зусилля в одному вузлі: 80–120 кН, прогини балок і плит: 35–60 мм, коефіцієнти використання міцності: 0.8–1.1. Характерний розвиток Zipper Collapse або Mixed-type failure [25] – руйнування поширюється на суміжні вузли та елементи.

Pushdown (імітація втрати несучої здатності від маси верхніх конструкцій); навантаження: зусилля в одному вузлі: 60–90 кН, загальне навантаження на поверх: 900–1100 кН, прогини балок і плит: 25–45 мм, коефіцієнт використання міцності 0.75. Результат: Pancake Collapse — поступове послідовне руйнування перекриттів зверху вниз.

Метод миттєвого видалення (миттєве видалення одного або кількох елементів конструкції з моделюванням навантажень у вузлах, до яких вони були під'єднані зі зворотним знаком, з урахуванням коефіцієнта динамічності $k = 2$);

навантаження: зусилля в одному вузлі: 150–200 кН (ударного типу), прогини балок і плит: 65–85 мм, коефіцієнти використання: 1.1–1.4.

Результат: розвиток Instability Collapse або Domino Collapse – руйнування поширюється через втрату рівноваги всієї підсистеми.

Динамічне навантаження: пікове зусилля в одному вузлі: 180–240 кН, прогини балок і плит: 70–100 мм, коефіцієнти використання: 1.25–1.6, час наростання навантаження: $t_1 = 0.2\text{--}0.4$ с. Результат: Mixed-type failure – швидка передача руйнування через динамічну нестійкість та імпульсну дію.



Рис. 3. Схема будівлі № 3, схеми поперечників крайніх частин та середньої, фрагмент каркаса будівлі, пошкодження перегородок

Будівля № 3 також належить до категорії конструктивних схем з неповним вбудованим залізобетонним каркасом (рис. 3) 1950-х рр. Основною відмінністю від будівлі № 2 є конструкція перекриттів. Перекриття виконані за схемою поздовжніх залізобетонних балок, які жорстко з'єднані з колонами вбудованого каркасу. Це забезпечує просторову жорсткість та сумісну роботу елементів каркасу. Поперечні балки виконані збірними залізобетонними елементами таврового перерізу. Вони спираються на поздовжні балки й формують другий рівень розподілу навантаження. На поперечні балки спираються балки-прогони заповнення –

збірні залізобетонні елементи таврового перерізу, що забезпечують спирання шлакобетонних дрібноштучних вкладок. Внаслідок ракетного удару російської федерації (попадання ракети в рівні покриття середньої частини) зруйновані конструкції покриття та масово зруйновані перегородки. Технічний стан несучих конструкцій перекриттів, стін, колон та балок вбудованого каркаса будівлі – задовільний (категорія стану «2») [11]. Руйнування конструкцій покриття відбулось у послідовному повздовжньому напрямку і це можна класифікувати як локальний «zipper collapse» [25] даху. Проте процес не пішов далі на основні конструкції несучих

стін, вбудованого каркасу та перекриттів. Це свідчить про високу стійкість будівлі до дії імпульсного навантаження, що пов'язано з особливостями роботи конструктивної схеми. У перекриттях із використанням шлакобетонних дрібноштучних вкладок по балках заповнення формується контактна система елементів без зв'язувального розчину. Це створює умови для виникнення сухого тертя – формує додатковий демпфуючий механізм, що особливо ефективний при короточасних динамічних діях – таких як вибух чи удар [26–28].

Також перегородки частково взяли участь у передачі горизонтальних навантажень – тимчасово працювали як елементи жорсткості: передаючи частину горизонтального імпульсу до основних несучих елементів несучих стін та вбудованого каркасу; обмежуючи переміщення суміжних конструкцій; поглинаючи частину енергії руйнування.

Для оцінки граничної межі поширення прогресуючого обвалення у дослідженнях [19; 20; 23–25] пропонується виконати аналіз енергетичного балансу.

У [19; 23; 24] пояснюється, як енергія від початкового обвалення може бути використана для оцінки ймовірності переходу обвалення на інші частини конструкції.

У [25] надано обґрунтування, що розвиток обвалення залежить від здатності структури поглинати або передавати енергію.

Єврокод EN 1991-1-7:2006 (ДСТУ EN 1991-1-7:2011) також вказує на можливість використання альтернативного шляху та оцінки динамічного відкликання для врахування прогресуючого обвалення.

Таким чином, можна сформулювати умову енергетичного підходу для того щоб визначити як буде поширюватись прогресуюче обвалення [19; 20; 23–25]:

$$E_{\text{вивільнена}} \geq E_{\text{необхідна}}. \quad (1)$$

$E_{\text{вивільнена}}$ – це потенційна енергія, яку мали елементи до моменту обвалення. Розрахунок енергії, що вивільняється

(наприклад, при обваленні плит перекриття):

$$E_{\text{вивільнена}} = \sum m_i \times g \times h_i, \quad (2)$$

де: m_i – маса i -тої плити або елемента, g – прискорення вільного падіння, h_i – висота, з якої падає елемент (висота поверху), враховується кінетичний компонент (енергія удару по нижнім конструкціям).

Для оцінки енергії, потрібної для ініціації руйнування наступної ділянки, або сусіднього блоку визначаємо енергію руйнування ригелів та колон наступної ділянки, яку здатні поглинати вузли, енергію дисипації, пов'язану з пластичними деформаціями та тріщиноутворенням:

$$E_{\text{необхідна}} = \sum (0.5 \times F_{\text{кри}} \times \delta_i), \quad (3)$$

де: $F_{\text{кри}}$ – граничне зусилля, яке необхідно прикласти до елемента для його руйнування, δ_i – відповідна деформація або прогин до зламу.

Для будівлі № 1 енергія падіння плит та ригелів складає 210 МДж (сумарна маса конструкцій, що обвалилась 1130.4 т).

Результати оцінки гравітаційної потенціальної енергії при обваленні 8-поверхової трипролітної залізобетонної рами (800 т маси): потенціальна енергія 1186.6 МДж. Таким чином, повна енергія, потрібна для поширення обвалення набагато більше ніж загальна енергія при фактичному обваленні конструкцій. Навіть при врахуванні динамічних ефектів (імпульс, втрату стабільності, інерційні сили при падінні), можна оцінити додатково коефіцієнт динамічності $k = 1.5\text{--}2.0$. Це пояснює чому не відбулося подальшого поширення прогресуючого обвалення на весь каркас будівлі № 1 в межах деформаційного блоку та на інший деформаційний блок.

Для залізобетонного зв'язкового каркаса будівлі № 1 для ініціації прогресуючого обвалення потрібне локальне руйнування одного або декількох ключових конструктивних елементів – центральна або крайня колона у поєднанні з ригелем.

Мінімум для запуску обвалення зв'язкового каркаса – зона первинного

ураження може виглядати наступним чином – площа руйнування 6×6 м (верхні поверхи) – 6×12 м (середні поверхи).

Також це може бути втрата 1–2 колон, які підтримують 1 ригель та 2–3 плити перекриття. Поверховий об'єм маси, що втрачає опору буде складати 20–40 т.

У випадку втрати центральної колони на рівні нижнього або середнього поверху буде найвищий ризик прогресуючого обвалення.

Проаналізуємо сценарії розповсюдження обвалення – межа переходу до повного прогресуючого обвалення.

Повне прогресуюче обвалення відбувається при втраті 3-х і більше колон у ряду або кутового вузла (колона + 2 ригелі).

При втраті 4-х колон в межах площі 6×12 м – відбувається поширення прогресуючого обвалення на всю висоту каркаса.

Залізобетонні ригелі, що з'єднують ≥ 3 -х колон, при втраті середньої – не в змозі утримати навантаження від вищого поверху – викликає горизонтальну прогресію руйнування.

У будівлі № 2 потенційна енергія обвалення згідно (2) складає 38.5 МДж.

Приймаємо, що 1 м^2 перекриття (плита + балки) може поглинути 25–30 кДж до повного руйнування. Тоді загальна енергія поглинання згідно (3) складає 14.28 МДж.

Прогноз обвалення – умова прогресуючого обвалення (1) виконується: $38.45 \text{ МДж} > 14.28 \text{ МДж}$.

Для ініціації прогресуючого обвалення потрібне локальне руйнування одного або декількох ключових конструктивних елементів – колони, балки, плити.

Мінімум для запуску обвалення будівлі № 2 зі змішаною конструктивною схемою: руйнування 3-х колон у ряд (однакова вісь) або більше 6-х у площині будівлі; руйнування та падіння плит у 2 рівнях поспіль; руйнування конструкцій одного прольоту (в межах шагу колон) – може спричинити обвалення до 50 % будівлі, так як енергія поширення не стримується – зв'язки відсутні.

Для будівлі № 3 енергія падіння кроквяних конструкцій складає до 10 МДж.

Результати оцінки гравітаційної потенціальної енергії при руйнуванні умовного поперечника будівлі 150 МДж.

Повна енергія, потрібна для поширення обвалення набагато більше ніж загальна енергія обвалення навіть при врахуванні динамічних ефектів.

Висновки

Виконане узагальнення на основі даних інструментального обстеження будівель з різними конструктивними схемами та численного моделювання сценарії розвитку прогресуючого обвалення у квазістатичних та в динамічному режимах. Квазістатичні методи аналізу прогресуючого обвалення та динамічне моделювання доцільно використовувати в комплексі від простої оцінки до детального моделювання. Квазістатичні методи Push-down дозволяють виконати оцінку граничної несучої здатності конструкції – скільки навантаження може витримати конструкція до обвалення, но не враховує динаміки руйнування. Тому що, при зростанні навантаження конструкції «адаптуються».

Квазістатичне миттєве видалення елементів – моделює раптом втрачені опори через вибух) показує, як система реагує на раптовий перерозподіл зусиль – локальне обвалення та ланцюгових ефектів. Неможливо врахувати швидкість передачі навантажень.

Квазістатичні методи Push-down дозволяють виконати первинну оцінку від втрати колон, але все ще не моделює повноцінну динаміку.

Динамічне моделювання (із наростанням навантаження) дозволяє виконати більш реалістичну оцінку розвитку прогресуючого обвалення у просторі та часі, але складніше у реалізації, потребує більш точних вхідних даних.

Наведено алгоритм аналізу критичних сценаріїв можливого поширення прогресуючих обвалень для оцінки ризиків в умовах надзвичайних ситуацій.

Розроблено, на основі існуючих досліджень, алгоритм прогнозу можливого поширення прогресуючих обвалень будівель з різними конструктивними схемами на основі енергетичного балансу системи (сумарна енергія «руйнування» в порівнянні з поглинальною здатністю сусідніх елементів).

Каркасна будівля з більш сучасною конструктивною схемою показала гірші результати на поширення прогресуючого обвалення при впливах від ракетних ударів в порівнянні з будівлями зі змішаною конструктивною схемою, що включає несучі стіни та вбудований каркас.

Конструктивна схема будівлі з більш «старою» змішаною схемою з дрібнорозмірними елементами заповнення

перекриттів показала кращі результати у разі впливу ракетних ударів за рахунок додаткового сухого тертя між елементами як амортизатора.

Обсяг обвалення залежить не тільки від маси, але й від: типу конструктивної схеми, жорсткості вузлів, присутності зв'язків та їх типу, розподілу навантажень.

Енергетичний підхід дозволяє: порівнювати різні сценарії поширення прогресуючого обвалення; робити кількісну оцінку потенційної небезпеки; визначати конструктивні елементи, від яких залежить стійкість та межа поширення руйнування (наприклад, руйнування до 2 колон та одного ригеля зазвичай не викликає повного обвалення, якщо структура здатна поглинути енергію).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДБН В.1.2-14:2018. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд. Київ : Мінрегіон України, 2018. 36 с.
2. ДБН В.2.2-41:2019. Висотні будівлі. Основні положення. Київ : Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2019. 50 с.
3. ДБН В.2.2-5:2023. Захисні споруди цивільного захисту. Київ : Міністерство розвитку громад, територій та інфраструктури України, 2023. 119 с.
4. ДБН В.2.6-98:2009. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення. Київ : Мінрегіонбуд України, 2011. 71 с.
5. ДБН В.2.6-162:2010. Кам'яні та армокам'яні конструкції. Основні положення. Київ : Мінрегіонбуд України, 2011. 97 с.
6. ДБН В.2.6-198:2014. Сталеві конструкції. Норми проектування. Київ : Мінрегіон України, 2014. 199 с.
7. ДБН В.2.1-10:2018. Основи та фундаменти. Основні положення проектування. Київ : Мінрегіонбуд України, 2018. 36 с.
8. ДБН В.1.1-12:2014 (із Зміною №1 від 01.05.2019). Будівництво у сейсмічних районах України. Київ : Мінрегіонбуд України, 2014. 110 с.
9. Наказ від 06.08.2022 № 144 Міністерства розвитку громад та територій України «Про затвердження Методики проведення обстеження та оформлення його результатів».
10. ДСТУ Б В.2.6-210:2016. Оцінка технічного стану сталевих будівельних конструкцій, що експлуатуються. Київ : Мінрегіон України, 2017. 80 с.
11. ДСТУ 9273:2024. Настанова щодо обстеження будівель і споруд для визначення та оцінювання їхнього технічного стану. Механічний опір та стійкість. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2024. 74 с.
12. ДСТУ Б В.3.1-2:2016. Ремонт і підсилення несучих і огорожувальних будівельних конструкцій та основ будівель та споруд. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2017. 67 с.
13. ДСТУ-Н Б EN 1993-1-2:2010. Єврокод 3. Проектування сталевих конструкцій. Частина 1–2. Загальні положення. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість (EN 1993-1-2:2005, IDT). Київ : Мінрегіонбуд України, 2010. 106 с.
14. ДСТУ-Н Б EN 1991-1-2:2010. Єврокод 1. Дії на конструкції. Частина 1–2. Загальні дії. Дії на конструкції під час пожежі (EN 1991-1-2:2002, IDT). Київ : Мінрегіонбуд України, 2010. 80 с.
15. EN 1991-1-7. Eurocode 1: Actions on structures – Part 4 : Part 1-7 : General actions – Accidental actions : EN 1991-1. Brussels : Management Centre, 2006. 69 p. (European Standard).
16. ANSI/AISC 360-16. An American National Standard. Specification for Structural Steel Buildings : American Institute of Steel Construction, 2016. 680 p.
17. Steel construction. Thirteenth edition : American Institute of Steel Construction, 2005. 2181 p.
18. Best Practices for Reducing the Potential for Progressive Collapse in Buildings. NIST, February 2007. DOI:10.6028/NIST.IR.7396 Corpus ID: 114475501.
19. UFC 4-023-03 (Including Change 4, 10 June 2024). Unified facilities criteria. Design of buildings to resist

progressive collapse. (Department of defense USA).

20. General Service Administration Alternate path analysis & design guidelines for progressive collapse resistance Revision 1, January 28, 2016. URL: <https://www.gsa.gov/real-estate/design-and-construction/engineering-and-architecture/security-engineering>.

21. American Society of Civil Engineers ASCE 76-23 : Standard for mitigation of disproportionate collapse potential in buildings and other structures ASCE Library (2023), URL: <https://ascelibrary.org/doi/book/10.1061/9780784415931>

22. FEMA P-751. Design Guide for Improving School Safety in Earthquakes, Floods and High Winds. 2009. URL: https://www.wbdg.org/FFC/DHS/ARCHIVES/FEMA_P751_NEHRP_Design_Examples_2009.pdf

23. UFC 4-023-07. Design to Resist the Effects of Accidental Explosions. Department of defense USA. 2008. URL: <https://www.wbdg.org/ffc/dod/unified-facilities-criteria-ufc/ufc-3-340-02>

24. UFC 3-340-01. Design and Analysis of Hardened Structures to Conventional Weapons Effects. Department of defense USA. 2002. URL: <https://www.wbdg.org/ffc/dod/unified-facilities-criteria-ufc/ufc-3-340-01>

25. Starossek U. Progressive collapse of structures (Second edition). ICE Publishing, Westminster, London, 2017. DOI: 10.1680/jpcos.61682.

26. Давыдов И. И. Особенности расчета и защиты строительных конструкций от прогрессирующего обрушения. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2010. № 11. С. 38–46.

27. Радкевич А. В., Давыдов І. І., Чабан В. П., Ковтун К. А. Аналіз методів розрахунку на прогресуюче обвалення одноповерхових каркасних виробничих будівель та пошук можливостей підвищення точності розрахунків. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2024. № 1 (019). С. 122–129. DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.270224.122.1032.

28. Mohamad Taklas, Moussa Leblouba, Samer Barakat, Ahmed Fageeri & Firass Mohamad. Concrete-to-concrete shear friction behavior under cyclic loading : experimental investigation. 2022. URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-13530-5> www.nature.com/scientificreports

REFERENCES

1. DBN V.1.2-14:2018. *Zahal'ni pryntsypy zabezpechennya nadiynosti ta konstruktyvnoyi bezpeky budivel' i sporud* [DBN B.1.2-14:2018. General principles for ensuring the reliability and structural safety of buildings and structures]. Kyiv : Ministry for Communities and Territories Development of Ukraine, 2018, 36 p. (in Ukrainian).

2. DBN V.2.2-41:2019. *Vysotni budivli. Osnovni polozhennya* [DBN B.2.2-41:2019. High-rise buildings. Basic provisions]. Kyiv : Ministry for Communities and Territories Development of Ukraine, 2019, 50 p. (in Ukrainian).

3. DBN V.2.2-5:2023. *Zakhysni sporudy tsyvil'noho zakhystu* [DBN B.2.2-5:2023. Protective structures of civil protection]. Kyiv : Ministry for Communities, Territories and Infrastructure Development of Ukraine, 2023, 119 p. (in Ukrainian).

4. DBN V.2.6-98:2009. *Betonni ta zalizobetonni konstruktsiyi. Osnovni polozhennya* [DBN B.2.6-98:2009. Concrete and reinforced concrete structures. Basic provisions]. Kyiv : Ministry of Regional Development of Ukraine, 2011, 71 p. (in Ukrainian).

5. DBN V.2.6-162:2010. *Kam'yani ta armokam'yani konstruktsiyi. Osnovni polozhennya* [DBN B.2.6-162:2010. Masonry and reinforced masonry structures. Basic provisions]. Kyiv : Ministry of Regional Development of Ukraine, 2011, 97 p. (in Ukrainian).

6. DBN V.2.6-198:2014. *Stalevi konstruktsiyi. Normy proektuvannya* [DBN B.2.6-198:2014. Steel structures. Design standards]. Kyiv : Ministry for Communities and Territories Development of Ukraine, 2014, 199 p. (in Ukrainian).

7. DBN V.2.1-10:2018. *Osnovy ta fundamente. Osnovni polozhennya proektuvannya* [DBN B.2.1-10:2018. Foundations and substructures. Basic design principles]. Kyiv : Ministry of Regional Development of Ukraine, 2018, 36 p. (in Ukrainian).

8. DBN V.1.1-12:2014 (із Зміною №1 від 01.05.2019р.). *Budivnytstvo u seysmichnykh rayonakh Ukrayiny* [DBN B.1.1-12:2014 (with Amendment No. 1 from 01.05.2019). Construction in seismic regions of Ukraine]. Kyiv : Ministry of Regional Development of Ukraine, 2014, 110 p. (in Ukrainian).

9. *Nakaz vid 06.08.2022 № 144 Ministerstva rozvytku hromad ta terytoriy Ukrayiny "Pro zatverdzhennya Metodyky provedennya obstezhennya ta oformlennya yoho rezul'tativ"* [Order No. 144 dated 06.08.2022 of the Ministry for Communities and Territories Development of Ukraine "On approval of the Methodology for conducting surveys and documenting their results"]. (in Ukrainian).

10. DSTU B V.2.6-210:2016. *Otsinka tekhnichnoho stanu stalevykh budivel'nykh konstruktsiy, shcho ekspluatuyut'sya* [DSTU B V.2.6-210:2016. Evaluation of the technical condition of in-service steel building structures]. Kyiv : Ministry for Communities and Territories Development of Ukraine, 2017, 80 p. (in Ukrainian).

11. DSTU 9273:2024. *Nastanova shchodo obstezhennya budivel' i sporud dlya vyznachennya ta otsinyuvannya yikhnoho tekhnichnoho stanu. Mekhanichnyy onip ta stiykist'* [DSTU 9273:2024. Guidelines for the inspection of buildings and structures for the determination and assessment of their technical condition. Mechanical integrity and

stability]. Kyiv : SE "UkrNDNC", 2024, 74 p. (in Ukrainian).

12. DSTU B V.3.1-2:2016. *Remont i pidsylennya nesuchykh i ohorodzhuval'nykh budivel'nykh konstruktsey ta osnov budivel' ta sporud* [DSTU B V.3.1-2:2016. Repair and strengthening of load-bearing and enclosing building structures and foundations of buildings and structures]. Kyiv : SE "UkrNDNC", 2017, 67 p. (in Ukrainian).

13. DSTU-N B EN 1993-1-2:2010. *Yevrokod 3. Proektuvannya stalevykh konstruktsey. Chastyna 1-2. Zahal'ni polozhennya. Rozrakhunok konstruktsey na vohnestiykist' (EN 1993-1-2:2005, IDT)* [DSTU-N B EN 1993-1-2:2010. Eurocode 3. Design of steel structures. Part 1-2. General rules. Structural fire design (EN 1993-1-2:2005, IDT)]. Kyiv : Ministry of Regional Development of Ukraine, 2010, 106 p. (in Ukrainian).

14. DSTU-N B EN 1991-1-2:2010. *Yevrokod 1. Diyi na konstruktseyi. Chastyna 1-2. Zahal'ni diyi. Diyi na konstruktseyi pid chas pozhezhi (EN 1991-1-2:2002, IDT)* [DSTU-N B EN 1991-1-2:2010. Eurocode 1. Actions on structures. Part 1-2. General actions. Actions on structures exposed to fire (EN 1991-1-2:2002, IDT)]. Kyiv : Ministry of Regional Development of Ukraine, 2010, 80 p. (in Ukrainian).

15. EN 1991-1-7. Eurocode 1 : Actions on structures – Part 4 : Part 1-7 : General actions – Accidental actions : EN 1991-1. Brussels : Management Centre, 2006, 69 p. (European Standard).

16. ANSI/AISC 360-16. An American National Standard. Specification for Structural Steel Buildings : American Institute of Steel Construction, 2016, 680 p.

17. Steel construction. Thirteenth edition : American Institute of Steel Construction, 2005, 2181 p.

18. Best Practices for Reducing the Potential for Progressive Collapse in Buildings. NIST, February 2007. DOI:10.6028/NIST.IR.7396 Corpus ID: 114475501.

19. UFC 4-023-03 (Including Change 4, 10 June 2024). Unified facilities criteria. Design of buildings to resist progressive collapse. (Department of defense USA).

20. General Service Administration Alternate path analysis & design guidelines for progressive collapse resistance (2016) URL: <https://www.gsa.gov/real-estate/design-and-construction/engineering-and-architecture/security-engineering>. Revision 1, January 28, 2016.

21. American Society of Civil Engineers ASCE 76-23 : Standard for mitigation of disproportionate collapse potential in buildings and other structures ASCE Library (2023), URL: <https://ascelibrary.org/doi/book/10.1061/9780784415931>

22. FEMA P-751. Design Guide for Improving School Safety in Earthquakes, Floods and High Winds. 2009. URL: https://www.wbdg.org/FFC/DHS/ARCHIVES/FEMA_P751_NEHRP_Design_Examples_2009.pdf

23. UFC 4-023-07. Design to Resist the Effects of Accidental Explosions. Department of defense USA, 2008. URL: <https://www.wbdg.org/ffc/dod/unified-facilities-criteria-ufc/ufc-3-340-02>

24. UFC 3-340-01. Design and Analysis of Hardened Structures to Conventional Weapons Effects. Department of defense USA, 2002. URL: <https://www.wbdg.org/ffc/dod/unified-facilities-criteria-ufc/ufc-3-340-01>

25. Starossek U. Progressive collapse of structures (Second edition), ICE Publishing, Westminster, London, 2017. DOI: 10.1680/jpcos.61682.

26. Davydov I.I. *Osobennosti rascheta y zashchyty stroytel'nykh konstruktsey ot prohressyruyushcheho obrusheniya* [Features of the design and protection of building structures against progressive collapse]. *Visnyk Prydniprovskoyi Derzhavnoyi Akademiyi Budivnytstva ta Arkhitektury* [Bulletin of the Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture], 2010, no. 11, pp. 38–46. (in Russian).

27. Radkevych A.V., Davydov I.I., Chaban V.P. and Kovtun K.A. *Analiz metodiv rozrakhunku na prohresuyuche obvalennya odnopoverkhovykh karkasnykh vyrobnychuykh budivel' ta poshuk mozhlyvostey pidvyshchennya tochnosti rozrakhunkiv* [Analysis of calculation methods for progressive collapse of single-storey frame industrial buildings and search for opportunities to improve calculation accuracy]. *Ukrayins'kyi zhurnal budivnytstva ta arkhitektury* [Ukrainian Journal of Civil Engineering and Architecture]. 2024, no. 1 (019), pp. 122–129. DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.270224.122.1032. (in Ukrainian).

28. Mohamad Taklas, Moussa Leblouba, Samer Barakat, Ahmed Fageeri and Firass Mohamad. Concrete-to-concrete shear friction behavior under cyclic loading: experimental investigation. 2022. URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-13530-5> www.nature.com/scientificreports

Надійшла до редакції: 01.09.2025.