

УДК 69.04

АПРОБАЦІЯ МЕТОДИКИ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОГРЕСУЮЧОГО ОБВАЛЕННЯ НА ПРИКЛАДІ РЕАЛЬНОГО АВАРІЙНОГО ВПЛИВУ НА ОБ'ЄКТ БУДІВНИЦТВА

М.О. Вабіщевич,
д-р техн. наук, професор

І.К. Фесун,
аспірант

А.М. Ращенко,
старший викладач

Київський національний університет будівництва і архітектури

DOI: 10.32347/2410-2547.2026.116.172-180

У статті розглянуто проблематику традиційних підходів визначення стійкості до прогресуючого обвалення, регламентованими вітчизняними та закордонними стандартами, що базуються на принципі незалежності від типу загрози. Для підвищення прогнозуючої точності та надійності аналізу пропонується розширення традиційного підходу до моделювання за рахунок розгляду більш складних та реалістичних сценаріїв пошкоджень. Запропоновано ефективну методику розрахунку на стійкість до прогресуючого обвалення будівель і споруд. Для апробації методики наведено результати моделювання прогресуючого обвалення сталевих каркасів будівлі класу наслідків ССЗ, що зазнав локальних пошкоджень внаслідок реального аварійного впливу (влучання БпЛА).

Ключові слова: моделювання, прогресуюче обвалення, раптове видалення, квазістатичний метод, динамічний метод, пошкодження, руйнування.

Вступ. В сучасних умовах, зумовлених зростанням ризиків виникнення надзвичайних ситуацій воєнного характеру, проблематика забезпечення живучості будівель і споруд набуває додаткової актуальності. Особливу загрозу становлять локальні руйнування несучих елементів внаслідок вибухових або ударних впливів, що можуть призвести до прогресуючого обвалення (надалі по тексті – ПО) будівель і споруд.

Постановка проблеми. Чинні нормативні підходи визначення стійкості до прогресуючого обвалення, регламентовані вітчизняними [1] та закордонними стандартами [2, 3], зазвичай базуються на принципі незалежності від типу загрози. Це відбувається шляхом моделювання раптового видалення однієї колони або іншої вертикальної несучої конструкції з розрахункової схеми [5]. Згідно із даними статистичних досліджень випадків прогресуючого обвалення [4], такий підхід є вірогідним, однак, не повною мірою відображає реальні сценарії обвалення, зокрема не враховує характер причин аварій конструкцій та її вплив на сусідні елементи.

Викладення основного матеріалу. Для підвищення прогнозуючої точності та надійності аналізу пропонується розширення традиційного підходу до моделювання за рахунок розгляду більш складних та реалістичних сценаріїв пошкоджень. Моделювання процесу прогресуючого обвалення із урахуванням причини, що призвела до руйнуючої події (аварійного впливу) можливе такими шляхами:

- пряме моделювання аварійного впливу із гарантованим руйнуванням окремої конструкції (конструкцій);
- моделювання раптового видалення конструкцій із врахуванням руйнувань та пошкоджень суміжних конструкцій, що з'явилися після аварійного впливу.

Останній шлях дозволяє не розглядати безпосередньо причину аварійного впливу, афокусуватися на наслідках цього впливу: на факті руйнування однієї та/або декількох конструкцій та/або пошкодження суміжних конструкцій. Моделювання може бути виконане такими шляхами:

- видалення кількох колон;
- врахування часткового пошкодження сусідніх колон;
- врахування пошкодження суміжних елементів перекриття або покриття;
- врахування розвантаження несучих конструкцій внаслідок руйнування легких конструкцій.

На основі результатів серії верифікаційних чисельних розрахунків [6], сформовано ефективну методику 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 (рис. 1.)



Рис. 1. Схема запропонованої методики розрахунку будівель і споруд на стійкість до прогресуючого обвалення

Для апробації методики виконано чисельне моделювання реального обвалення конструкцій, що виникло внаслідок аварійного впливу на громадську будівлю каркасного типу. Об'єкт дослідження в об'ємно-планувальному рішенні являє собою двоповерхову будівлю з підвалом складної форми у плані. Будівля зведена у 2023–2024 рр., використовується як частина об'єкта громадського призначення, клас наслідків СС3 (значні наслідки). Підземна частина будівлі представлена неповним монолітним залізобетонним каркасом, надземна частина – повний металевий каркас. Зовнішнє стінове огороження та покрівля виконані з легких сендвіч-панелей із заповненням мінераловатним утеплювачем. Загальний вигляд будівлі під час зведення представлено на рис. 2.

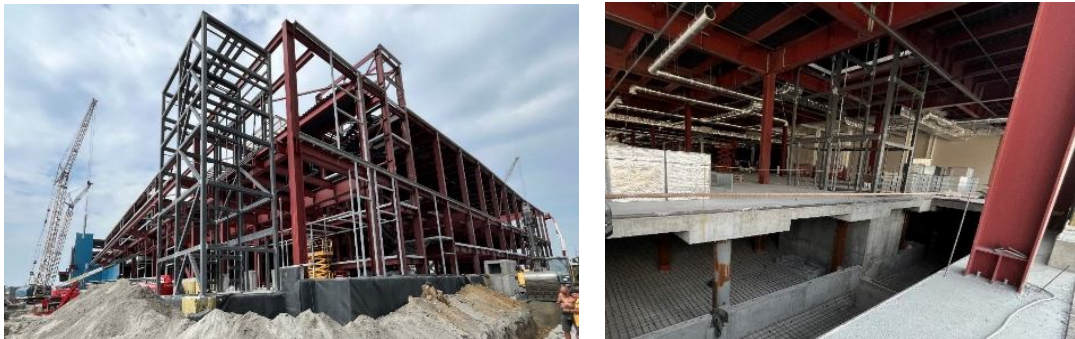


Рис. 2. Загальний вигляд будівлі під час зведення

У березні 2025 р. будівля зазнала уражаючої дії БпЛА, а саме дрону-камікадзе типу «Shahed». Влучання відбулося у верхній кут будівлі, що призвело до локального руйнування ділянки головної балки покриття, на яку спирається прогін. В зоні ураження зафіксовано пошкодження суміжних несучих конструкцій: вигин елементів із площини, місцеві розриви сталі, втрата місцевої стійкості, розриви зварних з'єднань.

Також відбулося повне руйнування легких конструкцій сендвіч-панелей, внутрішніх перегородок та покрівлі в радіусі вибухової хвилі. На рис. 3 представлено руйнування та пошкодження, що виникли внаслідок аварійного впливу.

Оцінка стійкості досліджуваної будівлі до прогресуючого обвалення відповідно до вимог [1] виконано у кілька етапів.

Етап 1. Побудова скінченно-елементної моделі. Для проведення розрахунку було побудовано просторову скінченно-елементну модель. Колони, в'язі та балки змодельовані стержневими, а діафрагми жорсткості та плити перекриття – оболонковими елементами. У підземній частині з'єднання елементів прийнято жорсткими. В надземній частині реалізовано жорстке примикання ригелів перекриття до колон у площині рами, тоді як інші болтові та зварні з'єднання у початковій моделі розглядалися як ідеальні шарніри. Моделювання виконане у ПК SCAD Office, модель містить 97360 вузлів та 101170 елементів. Загальна просторова скінченно-елементна модель об'єкта будівництва приведена на рис. 4.



Рис. 3. Пошкодження будівлі внаслідок аварійного впливу

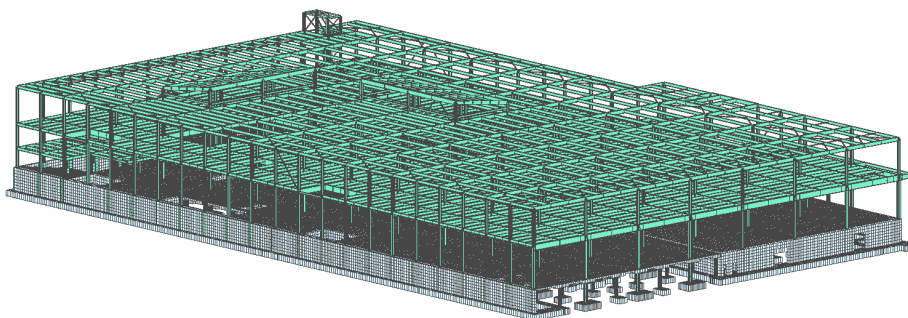


Рис. 4. Загальна просторова СЕ модель об'єкта будівництва

Етап 2. Аналіз за усталеною розрахунковою ситуацією. Розрахунок каркасу будівлі на проектні навантаження підтвердив відповідність прийнятих перерізів несучих елементів чинним нормам. Коефіцієнти використання в зоні аварійного впливу (рис. 5) до моменту ураження не перевищували 0.3–0.58, що свідчить про наявність експлуатаційного ресурсу конструкцій.

Етап 3. Уточнення жорсткості вузлів. Моделювання вузлів з'єднання балок і колон циліндричними шарнірами, яке було прийняте на етапі аналізу за усталеною розрахунковою ситуацією, при видаленні частини балки призводить до геометричної змінюваності каркасу. Для уточнення розрахункової жорсткості вузлів відповідно до їх конструктивних рішень (кількості болтів, довжини та катетів зварних швів, товщини ребер жорсткості, тощо) виконано близько 50 моделювань в ПК IDEA StatiCa [7]. Дана процедура передбачає перехід від ідеалізованих аналітичних моделей (ідеальний шарнір або повне защемлення) до реальної фізичної роботи з'єднань через визначення їхньої фактичної податливості. Окремі локальні розрахункові моделі представлено на рис. 6.

Етап 4. Традиційне моделювання прогресуючого обваллення. Виконано моделювання традиційного сценарію, а саме одиночного видалення частини головної балки, зумовлене ураженням БПЛА (див. рис. 5). Розрахунок виконано у квазістатичній та динамічній постановках з урахуванням фізичної і геометричної нелінійностей, що дозволило оцінити вірогідність нормативного підходу[1].

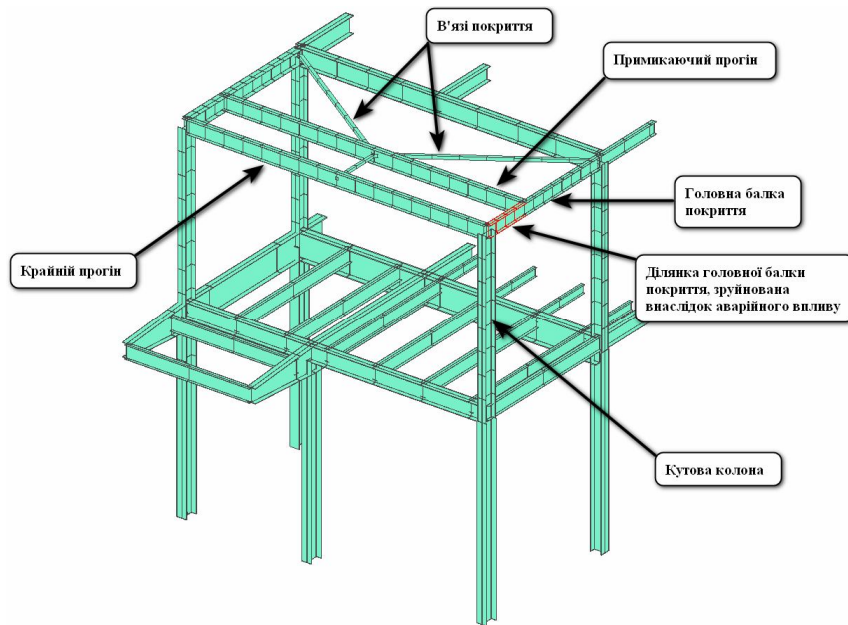


Рис. 5. Фрагмент схеми розміщення конструкцій в зоні пошкодження

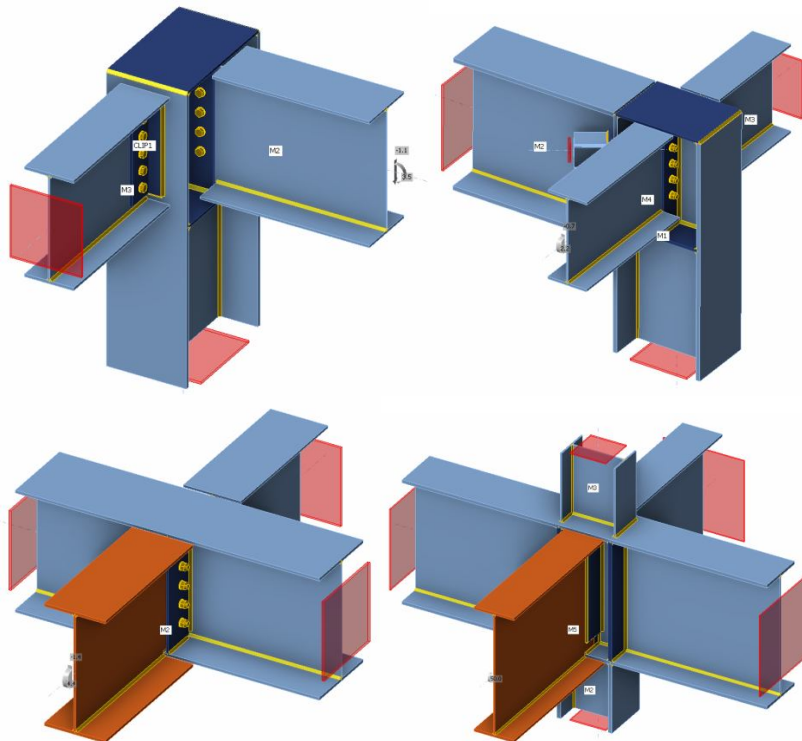


Рис. 6. Окремі розрахункові моделі ПК IDEA StatiCa

1. Квазістатичний метод. Раптове видалення елемента змодельовано шляхом прикладанням зворотних реакцій у примикаючих вузлах, помножених на коефіцієнт динамічності 1.2. Дане значення було прийняте відповідно до вимог [1] з огляду на регулярність кроку колон 6 м в напрямку видалення частини балки. Для сталевих конструкцій відповідно до вимог [1] застосовані коефіцієнт динамічного зміцнення, який для пластичних сталей складає 1.1, що

враховує підвищення межі текучості та межі міцності при високих швидкостях деформування, характеристики див. табл. 1. Гранична деформація аналогічно до вимог [1] складає 0.005.

Таблиця 1

Зведені характеристики зміцнення сталі згідно [1]

| Призначення | Марка сталі | Товщина, мм | $\sigma_{\text{ухаракт}}$, МПа | $\sigma_{\text{ихаракт}}$, МПа | Коеф. умов роботи | $\sigma_{\text{уміц}}$, МПа | $\sigma_{\text{изміц}}$, МПа |
|-----------------|-------------|---------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-------------------|------------------------------|-------------------------------|
| Фасонний прокат | С245 | від 2,0 до 20,1 включно | 245 | 370 | 1,1 | 269,5 | 407,0 |
| | | від 20,1 до 40,0 | 235 | 370 | 1,1 | 258,5 | 407,0 |
| Листовий прокат | С255 | від 2,0 до 3,9 включно | 255 | 380 | 1,1 | 280,5 | 418,0 |
| | | від 4,0 до 10,0 включно | 245 | 380 | 1,1 | 269,5 | 418,0 |
| | | від 10,1 до 20,0 включно | 245 | 370 | 1,1 | 269,5 | 407,0 |
| | | від 20,1 до 40,0 | 235 | 370 | 1,1 | 258,5 | 407,0 |
| | | від 8,0 до 16,0 включно | 355 | 470 | 1,1 | 390,5 | 517,0 |
| | С355 | від 16,1 до 40,0 включно | 345 | 470 | 1,1 | 379,5 | 517,0 |
| | | від 40,1 до 60,0 включно | 335 | 470 | 1,1 | 368,5 | 517,0 |
| | | від 60,1 до 80,0 включно | 325 | 460 | 1,1 | 357,5 | 506,0 |
| | | від 80,1 до 100,0 включно | 315 | 460 | 1,1 | 346,5 | 506,0 |
| | | від 100,1 до 160,0 | 295 | 460 | 1,1 | 324,5 | 506,0 |

Вертикальне переміщення вузла консолі, яка утворилася внаслідок вилучення ділянки головної балки, склало -201.32 мм. Внутрішні зусилля в зоні примикання головної балки до колони склали $M=11.55$ тсм та $Q=3.04$ тс. Попри те, що напруження безпосередньо в тілі балки залишалися в межах пружності, критична точка руйнування була виявлена у вузлі з'єднання. Підстановка отриманих зусиль у локальну модель IDEA StatiCa виявила розвиток значних пластичних деформацій у вигляді місцевого змінання стінки балки, а також критичне перевищення міцності болтів М20 8.8 на зріз при збереженні їхньої міцності на розтяг. При зіставленні отриманих зусиль з граничним опором вузла встановлено їх перевищення у 2.2 рази. Такий результат однозначно свідчить про руйнування цього з'єднання, що неминуче призводить до втрати опори та подальшого обвалення зони покриття.

2. Динамічний аналіз. Для отримання більш точної картини інерційних ефектів виконано пряме інтегрування рівнянь руху за часом. Динамічне зміцнення сталі прийнято аналогічно моделюванню квазістатичним методом. Процедура включала поетапне завантаження системи протягом 3 с, фази витримки тривалістю 4 с для повного затухання коливань, та фази раптового видалення елемента. Час прикладання зворотної реакції склав 0.0706942 с, що прийнято як 1/10 періоду власних коливань конструкцій без видаленої ділянки балки у вертикальному напрямку. Параметри демпфування по Релею визначено за модальним аналізом від першої частоти 2.21799 рад/с до вищої форми 8.88783 рад/с. Коефіцієнт модального демпфування прийнято на рівні 5%, що відповідає пружній стадії роботи сталевих конструкцій.

Максимальне вертикальне переміщення у момент пікового відхилення сягнуло -299.42 мм, що на 48.7% більше за результат квазістатичного розрахунку. Після затухання остаточне переміщення стабілізувалося на відмітці -168.38 мм. Врахування динамічного ефекту призвело до короточасного зростання згинального моменту на консолі до $M=17.182$ тсм та поперечної сили $Q=4.765$ тс. Хоч напруження в перерізі балки не виходять за межі пружності, це значення майже у 3.3 рази перевищує граничний опір болтового з'єднання. Аналіз напружено-деформованого стану вузла підтвердив зріз болтової групи та виникнення глибоких зон змінання в місцях контакту. Такі передумови також свідчать про руйнування цього з'єднання, що неминуче призводить до втрати опори та подальшого обвалення зони покриття.

Результати нормативного моделювання за [1] однозначно вказують на неминуче обвалення ділянки покриття через руйнування болтових з'єднань. Однак, фактичне обстеження будівлі після влучання БпЛА показало, що обвалення не відбулося, попри видалення частини балки. Така розбіжність між розрахунком та реальністю демонструє недостатність методу «чистого

одиначного видалення» елементів. Це обґрунтовує необхідність врахування реальної причини аварійного впливу та пошкоджень суміжних конструкцій, що дозволить максимально наблизити чисельну модель до реальної ситуації.

Згідно з обставинами аварії, описаними вище, уражаюча дія дрона-камікадзе характеризується потужною вибуховою хвилею. Цей вплив призвів не лише до локального руйнування ділянки головної несучої балки покриття, але й до першочергового знищення легких огорожувальних конструкцій, які мають значно менший опір вибуховому тиску порівняно зі сталевим каркасом.

Встановлено, що вибуховою хвилею було повністю зруйновано більше половини покрівлі кутової зони (профільований настил, утеплювач) та весь контур стінових сендвіч-панелей у межах кутової зони. Така зміна фізичного стану серйозно коригує розрахункову модель: руйнування огорожувальних конструкцій миттєво ліквідує навантаження, що передавалося від них на сталевий каркас. Це стосується як власної ваги самої покрівлі та панелей, так і тимчасових навантажень, що на них діяли (експлуатаційне сервісне навантаження та вага встановлених сонячних панелей).

Для перевірки цього припущення виконано нелінійний динамічний аналіз. Усі фізико-механічні параметри матеріалів та демпфування прийняті аналогічно до попередніх розрахунків. Особливість чисельної реалізації полягала в наступному: у момент ініціації, крім прикладання зворотних реакцій у вузлах видаленої балки, до розрахункової схеми прикладалися розвантажувальні сили. Ці сили були рівні за величиною та протилежні за напрямком тим навантаженням, які створювали покрівля, сендвіч-панелі та сонячні батареї (за винятком власної ваги самих сталевих несучих елементів каркаса).

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. Зокрема, максимальне вертикальне переміщення вузла склало 88.79 мм, що у 3 рази менше за показник, отриманий при «чистому» вилученні елемента, а остаточне переміщення після завершення перехідного процесу стабілізувалося на відмітці 52.67 мм. Аналіз силових факторів у зоні утвореної консолі показав, що максимальний згинальний момент у вузлі знизився до $M=5.122$ тсм, а поперечна сила склала $Q=1.509$ тс.

Виконаний на основі цих даних локальний розрахунок вузла у програмному комплексі IDEA StatiCa підтвердив збереження цілісності з'єднання. Хоча аналіз напружено-деформованого стану виявив наявність місцевого зминання стінки балки (пластичні деформації), перевірка болтів на зріз була успішно виконана. В даному контексті слід зауважити, що розвиток подібних пластичних деформацій в зминання сталі самі по собі ще не означають миттєвого обвалення, що підтверджено під час обстеження. Однак визначальним фактором, що ініціює руйнування в аналогічних схемах, є саме перевищення міцності болтів на зріз, оскільки такий тип руйнування є крихким і веде до повної та миттєвої втрати зв'язності конструкцій.

Таким чином, чисельне моделювання підтвердило фактичний стан об'єкта, на якому обвалення не відбулося. Це доводить, що динамічний довантажувальний ефект від втрати ділянки балки був значною мірою компенсований миттєвою втратою ваги огорожувальних конструкцій та покрівельного пирога, що дозволило каркасу зберегти загальну стійкість.

Висновки

1. На основі результатів серії верифікаційних чисельних розрахунків, вперше сформовано ефективну методику розрахунку будівель і споруд на стійкість до прогресуючого обвалення будівель і споруд. Методика базується на динамічному методі (пряме інтегрування рівнянь руху за часом) та складається з шести послідовних етапів. Виконано практичну апробацію розробленої методики розрахунку на стійкість до прогресуючого обвалення на прикладі реального об'єкта будівництва класу ССЗ, що зазнав аварійного впливу внаслідок уражаючої дії БпЛА.

2. Проведене дослідження доводить, що для об'єктів з легкими огорожувальними конструкціями при вибухових впливах критично важливим є врахування ініціації руйнування не лише несучих, а й огорожувальних елементів. Моделювання за вимогами норм, яке

розглядає лише вилучення колони чи балки, призводить до значної переоцінки результатів (у даному випадку – переоцінка внутрішніх зусиль у 2.2 та 3.3 рази).

3. Встановлено, що ключовим чинником, який забезпечив стійкість реальної будівлі, є миттєве розвантаження каркаса внаслідок руйнування легких огорожувальних конструкцій (покрівлі та сендвіч-панелей) вибуховою хвилею. Врахування цього ефекту в динамічній моделі призвело до зниження максимальних переміщень на 70%, порівняно до традиційних підходів, та зменшення внутрішніх зусиль до рівня сприйняття болтового з'єднання.

4. Аналіз напружено-деформованого стану вузлів підтвердив, що місцеве змінання стінок елементів (пластичні деформації) не обов'язково призводять до обвалення. Натомість визначальним чинником є зріз болтів, запобігання якому за рахунок ефекту розвантаження дозволило зберегти цілісність каркаса.

5. Висока збіжність результатів уточненого моделювання з фактичним станом об'єкта після аварії (відсутність обвалення) підтверджує достовірність запропонованої методики. Методика, що враховує комплексну дію аварійного впливу (видалення елемента + розвантаження від пошкодженого огородження), є більш точною та об'єктивною порівняно зі традиційними підходами.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. ДСТУ 9294:2024. Розрахунок будівель на стійкість до прогресуючого (непропорційного) обвалення. Чинний від 2025-03-01. Вид. офіц. Київ : ДП "УкрНДНЦ", 2025. 45 с.
2. General services administration. Alternate path analysis & design guidelines for progressive collapse resistance. Official edition. 2016. 203 p.
3. UFC 4-023-03. Unified facilities criteria. Design of buildings to resist progressive collapse. Official edition. Department of Defense (DoD), 2009. 244 p.
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.
5. Вабішевич М.О., Фесун І.К. Підходи щодо забезпечення стійкості до прогресуючого обвалення будівель та споруд. Сучасний стан та перспективи // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-техн. збірник. – К.: КНУБА, 2023. – Вип. 110. – С. 256-263.
6. Фесун І. К. Верифікація чисельних моделей прогресуючого обвалення сталевих рам за даними експериментального дослідження. Науковий вісник будівництва. 2025. № 113. С. 176–186.
7. Students, teachers & universities. IDEA StatiCa. URL: <https://www.ideastatica.com/students-universities>

REFERENCES

1. DSTU 9294:2024. Rozrakhunok budivel na stiikost do prohresuiuchoho (neproportsiinoho) obvalennia (Design of buildings for progressive (disproportionate) collapse resistance). Chynnyi vid 2025-03-01. Vyd. ofits. Kyiv : DP "UkrNDNTs", 2025. 45 s.
2. General services administration. Alternate path analysis & design guidelines for progressive collapse resistance. Official edition. 2016. 203 p.
3. UFC 4-023-03. Unified facilities criteria. Design of buildings to resist progressive collapse. Official edition. Department of Defense (DoD), 2009. 244 p.
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.
5. Vabishchevych M.O., Fesun I.K. Pidkhody shchodo zabezpechennia stiikosti do prohresuiuchoho obvalennia budivel ta sporud. Suchasnyi stan ta perspektyvy (Approaches to ensuring resistance to the progressive collapse of buildings and structures. Current state and prospects)// Opir materialiv i teoriia sporud: nauk.-tekhn. zbirnyk. – K.: KNUBA, 2023. – Vyp. 110. – S. 256-263.
6. Fesun I. K. Veryfikatsiia chyselnykh modelei prohresuiuchoho obvalennia stalevykh ram za danymy eksperymentalnoho doslidzhennia (Verification of numerical models for the progressive collapse of steel frames based on experimental research). Naukovyi visnyk budivnytstva. 2025. № 113. S. 176–186.
7. Students, teachers & universities. IDEA StatiCa. URL: <https://www.ideastatica.com/students-universities>.

Стаття надійшла 25.03.2026

Вабіщевич М.О., Фесун І.К., Ращенко А.М.

АПРОБАЦІЯ МЕТОДИКИ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОГРЕСУЮЧОГО ОБВАЛЕННЯ НА ПРИКЛАДІ РЕАЛЬНОГО АВАРІЙНОГО ВПЛИВУ НА ОБ'ЄКТ БУДІВНИЦТВА

У статті розглянуто проблематику традиційних підходів визначення стійкості до прогресуючого обвалення, регламентованими вітчизняними та закордонними стандартами, що базуються на принципі незалежності від типу загрози. Це відбувається шляхом моделювання раптового видалення однієї колони або іншої вертикальної несучої конструкції з розрахункової схеми. Згідно із даними статистичних досліджень випадків прогресуючого обвалення, такий підхід є вірогідним, однак, неповною мірою відображає реальні сценарії обвалення, зокрема не враховує характер причини аварії конструкції та її вплив на сусідні елементи.

Для підвищення прогнозуючої точності та надійності аналізу пропонується розширення традиційного підходу до моделювання за рахунок розгляду більш складних та реалістичних сценаріїв пошкоджень. На основі результатів серії верифікаційних чисельних розрахунків, запропоновано ефективну методику розрахунку на стійкість до прогресуючого обвалення будівель і споруд. Методика базується на динамічному методі (пряме інтегрування рівнянь руху за часом) та складається з шести послідовних етапів.

Для апробації методики наведено результати моделювання прогресуючого обвалення сталевго каркаса будівлі класу наслідків СС3, що зазнав локальних пошкоджень внаслідок реального аварійного впливу (влучання БпЛА). Проведено порівняльний аналіз результатів розрахунку за традиційною нормативною методикою раптового видалення одного елемента та за уточненим підходом, що базується на відтворенні фактичної картини руйнувань. Основну увагу приділено дослідженню ефекту динамічного розвантаження конструктивної системи, спричиненого миттєвим руйнуванням легких огорожувальних елементів та покрівлі вибуховою хвилею. Отримані дані підтверджують високу збіжність уточненої моделі з реальним станом об'єкта та дозволяють об'єктивно оцінити залишковий ресурс пошкоджених конструкцій для прийняття рішень щодо їх подальшого відновлення.

Ключові слова: моделювання, прогресуюче обвалення, раптове видалення, квазістатичний метод, динамічний метод, пошкодження, руйнування.

Vabishchevich M.O., Fesun I.K., Raschenko A.M.

APPROBATION OF A METHODOLOGY FOR MODELING PROGRESSIVE COLLAPSE USING THE EXAMPLE OF A REAL-WORLD ACCIDENTAL IMPACT ON A CONSTRUCTION SITE

In this article, the authors examine the issues associated with traditional approaches to determining resistance to progressive collapse, as regulated by national and international standards, which are based on the principle of independence from the type of threat. This is achieved by modeling the sudden removal of a single column or other vertical load-bearing structure from the structural model. According to statistical studies of progressive collapse cases, this approach is plausible; however, it does not fully reflect real collapse scenarios, in particular, it does not account for the nature of the cause of the structural failure and its impact on adjacent elements.

To improve the predictive accuracy and reliability of the analysis, it is proposed to expand the traditional modeling approach by considering more complex and realistic damage scenarios. Based on the results of a series of verification numerical calculations, an effective methodology for determining the resistance of buildings and structures to progressive collapse is proposed. The method is based on a dynamic approach (direct integration of the equations of motion over time) and consists of six sequential stages.

To validate the methodology, the results of modeling the progressive collapse of a steel-framed building of consequence class CC3, which sustained local damage due to a real emergency impact (UAV strike), are presented. A comparative analysis was conducted of the calculation results obtained using the traditional standard method of sudden removal of a single element and the refined approach based on reproducing the actual damage pattern. The main focus was on investigating the effect of dynamic unloading of the structural system caused by the instantaneous destruction of lightweight enclosure elements and the roof by a blast wave. The obtained data confirm the high consistency of the refined model with the actual condition of the structure and allow for an objective assessment of the remaining service life of the damaged structures to inform decisions regarding their further restoration.

Keywords: modeling, progressive collapse, sudden removal, quasi-static method, dynamic method, damage, failure.

УДК 69.04

Вабіщевич М.О., Фесун І.К., Ращенко А.М. Апробація методики моделювання прогресуючого обвалення на прикладі реального аварійного впливу на об'єкт будівництва // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-техн. збірник. – К.: КНУБА, 2026. – Вип. 116. – С. 172 – 180.

У статті наведено результати моделювання прогресуючого обвалення на прикладі реального аварійного впливу на об'єкт будівництва, які будуть корисними для інженерів-проектувальників та студентів будівельних спеціальностей ВНЗ.

Лл. 6. Бібліогр. 7 назв.

UDC 69.04

Vabishchevich M.O., Fesun I.K., Raschenko A.M. **Approbation of a methodology for modeling progressive collapse using the example of a real-world accidental impact on a construction site** // Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific and technical collected articles. – K.: KNUBA, 2026. – Issue 116. – P. 172 – 180.

This article presents the results of modeling progressive collapse on the example of a real emergency impact on a construction site, which will be useful for design engineers and civil engineering students at universities.

Fig. 6. Ref. 7

Автор: доктор технічних наук, професор, професор кафедри будівельної механіки КНУБА ВАБИЩЕВИЧ Максим Олегович

Адреса: 03037 Україна, м. Київ, проспект Повітряних Сил, 31, Київський національний університет будівництва і архітектури

Робочий тел.: +38 (044) 241-55-55

E-mail: vabix@ukr.net

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-0755-5186>

Автор: аспірант кафедри будівельної механіки ФЕСУН Ігор Костянтинович

Адреса: 03037 Україна, м. Київ, проспект Повітряних Сил, 31, Київський національний університет будівництва і архітектури

Тел.: +38 (098) 785-55-49

E-mail: fesuni99@gmail.com

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-6678-9900>

Автор: старший викладач кафедри геотехніки РАЩЕНКО Андрій Миколайович

Адреса: 03037 Україна, м. Київ, проспект Повітряних Сил, 31, Київський національний університет будівництва і архітектури

Робочий тел.: +38(044)-241-55-25

E-mail: raschenko.am@knuba.edu.ua

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-2948-3232>