

КОМУНАЛЬНЕ ГОСПОДАРСТВО МІСТ MUNICIPAL ECONOMY OF CITIES

НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЗБІРНИК
СЕРІЯ: ТЕХНІЧНІ НАУКИ ТА АРХІТЕКТУРА

ТОМ 3 ВИПУСК 191'2025

Ідентифікатор медіа у Реєстрі суб'єктів медіа R30-01140 від 10.08.2023 р.

Наукове фахове видання категорії «Б» за спеціальностями 121, 122, 123, 124, 125, 126, 131, 132, 133, 191, 192, 193, 194, 261, 263, 273, 274, 275 (наказ МОН України № 1301 від 15.10.2019 р.), 141, 183 (наказ МОН України № 1643 від 28.12.2019 р.)

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

БАБАЄВ В.М.	відповідальний редактор, д.держ.упр., голова Вченої ради ХНУМГ ім. О.М. Бекетова
СУХОНОС М.К.	відповідальний секретар, д.т.н., проректор з наукової роботи, ХНУМГ ім. О.М. Бекетова
ДЯДІН Д.В. КОГАЛОВСЬКИЙ В.	к.т.н., ХНУМГ ім. О.М. Бекетова к.т.н., Інженерний коледж «Самі Шамун», Ізраїль
ПЛЮГІН В.Є. ЧУМАЧЕНКО І.В. ШЕВЧЕНКО Р.І.	д.т.н., ХНУМГ ім. О.М. Бекетова д.т.н., ХНУМГ ім. О.М. Бекетова д.т.н., НУЦЗ України
ШМУКЛЕР В.С.	д.т.н., ХНУМГ ім. О.М. Бекетова
ШПАЧУК В.П. АЛЕШ ДІТРИХ	д.т.н., ХНУМГ ім. О.М. Бекетова PhD, Технічний університет Ліберті

EDITORIAL BOARD

BABAYEV V.	Editor-in-Chief, Dr.Sc., Chairman of the Academic Council of the O.M. Beketov NUUE
SUKHONOS M.	Executive Managing Editor, Dr. Sc., Vice-rector of the O.M. Beketov NUUE
DIADIN D. KAGALOVSKY V.	PhD, O.M. Beketov NUUE PhD, Engineering College “Sami Shamun”, Israel
PLUGIN V. CHUMACHENKO I. SHEVCHENKO R.	Dr.Sc., O.M. Beketov NUUE Dr.Sc., O.M. Beketov NUUE Dr.Sc., NUCDU
SHMUKLER V.	Dr.Sc., O.M. Beketov NUUE
SHPACHUK V. ALEŠ DITTRICH	Dr.Sc., O.M. Beketov NUUE PhD, Technical University of Libere, Czech Republic

КООРДИНАЦІЙНА РАДА

ШУТЕНКО Л.М.	голова координаційної ради, д.т.н., почесний ректор ХНУМГ ім. О.М. Бекетова
ГОВОРОВ П.П. ДАЛЕКА В.Х. ДРЕВАЛЬ І.В. ДУШКІН С.С. КОНДРАЩЕНКО О.В. МАЛЯРЕНКО В.А. МИХАЙЛИШИН О.Л. ОСИЧЕНКО Г.О. ТОВБИЧ В.В. ФЕЙРУША С.Х.	д.т.н., ХНУМГ ім. О.М. Бекетова д.т.н., ХНУМГ ім. О.М. Бекетова д.арх., ХНУМГ ім. О.М. Бекетова д.т.н., ХНУМГ ім. О.М. Бекетова д.т.н., ХНУМГ ім. О.М. Бекетова д.арх., НУВГП д.арх., ХНУМГ ім. О.М. Бекетова д.арх., КНУБА к.т.н., Університет Салахаддін – Ербіл, Ірак
ХАРЧЕНКО В.Ф. ЧЕЧЕЛЬНИЦЬКИЙ С.Г. ЧУДНОВСЬКИЙ А.	д.т.н., ХНУМГ ім. О.М. Бекетова д.арх., ХНУМГ ім. О.М. Бекетова к.т.н., Гамбурзький університет, Германія
ЮРКЕВИЧ І.	к.т.н., Астонський університет, Великобританія
ЯНКЕЛЕВИЧ М.	к.т.н., Парсонс, США

COORDINATION COUNCIL

SHUTENKO L.	Chairman of the Coordination Council, Dr.Sc., Honorary Rector of the O.M. Beketov NUUE
GOVOROV P. DALEKA V. DREVAL I. DUSHKIN S. KONDRASHENKO O. MALYARENKO V. MYHAYLISHYN O. OSYCHENKO G. TOVBICH V. FEIRUSHA S.	Dr.Sc., O.M. Beketov NUUE Dr.Sc., O.M. Beketov NUUE Dr.Sc., O.M. Beketov NUUE Dr.Sc., O.M. Beketov NUUE Dr.Sc., O.M. Beketov NUUE Dr.Sc., NUWEE Dr.Sc., O.M. Beketov NUUE Dr.Sc., KNUCA PhD, Salahaddin University – Erbil, Iraq
HARCHENKO V. CHECHELNITSKY S. CHUDNOVSKIY A.	Dr.Sc., O.M. Beketov NUUE Dr.Sc., O.M. Beketov NUUE PhD, University of Hamburg, Germany
YURKEVICH I.	PhD, Aston University, United Kingdom
YANKELEVICH M.	PhD, PARSONS, USA

Адреса редакції / Editorial office address:

61002, м. Харків, вул. Чорноглазівська, 17 / 17, Chornoglazivska Street, Kharkiv, 61002

Тел./tel.: +38 (057) 707-33-21, e-mail: khg@kname.edu.ua

ISSN (print) 2522 – 1809

ISSN (online) 2522 – 1817

Затверджений до друку Науково-технічною Радою Харківського національного університету міського господарства імені О.М. Бекетова (протокол № 10 від 26 травня 2025 року)

© ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2025

Р.І. Майборода, Ю.А. Отрош

Національний університет цивільного захисту України, Черкаси, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДИКИ РОЗРАХУНКУ СТІЙКОСТІ ДО ПРОГРЕСУЮЧОГО ОБВАЛЕННЯ БУДІВЕЛЬ ВНАСЛІДОК ПОЖЕЖІ ТА ВИБУХУ

В роботі розглянуто сучасний стан питання можливості проведення розрахунків на стійкість залізобетонних будівель до прогресуючого обвалення внаслідок пожежі та внутрішнього дефлаграційного вибуху, запропонована методика для проведення розрахунків з оцінювання стійкості залізобетонних будівель до прогресуючого обвалення внаслідок пожежі та внутрішнього дефлаграційного вибуху.

Ключові слова: прогресуюче обвалення, непропорційне руйнування, пожежа, внутрішній дефлаграційний вибух, позапроектні навантаження

Постановка проблеми

У разі пожежі або вибуху втрачається несуча здатність будівлі чи окремих її елементів й порушується стійкість будівлі. Окрім значних матеріальних збитків, пожежа створює критичну загрозу для життя та здоров'я людей, що перебувають у будівлі, а також для рятувальників, які здійснюють евакуацію та гасіння вогню. Особливу небезпеку становить ризик прогресуючого обвалення несучих елементів, спричиненого деградацією їх міцності під впливом високих температур, надлишкових тисків вибухів, що може призвести до раптового руйнування конструкції без попереджувальних ознак.

У більшості випадків руйнування несучих конструкцій призводить до повного обвалення будівлі та знищення матеріальних цінностей і обладнання.

Конструктивне рішення будь-якої будівлі повинно забезпечувати її міцність і стійкість, принаймні на час, необхідний для повної евакуації людей, навіть якщо несуча конструкція буде локально зруйнована пожежею чи вибухом або їх спільної дії.

Загалом дослідження безпеки будівель і будівельних конструкцій призвели до вивчення характеристик та значень живучості, які забезпечують стійкість будівель і будівельних конструкцій до аварійних впливів і прогресуючого обвалення [1].

Аналізуючи закордонні та вітчизняні стандарти, кодекси, наукові праці, які наводять поняття прогресуючого обвалення, визначена неоднозначність у трактуванні самого поняття, що лише підтверджує невивченість питання прогресуючого обвалення.

Перший випадок прогресуючого обвалення стався в 1968 році, коли 22-поверхове житлове крило будівлі Ronan Point Building (Лондон) було повністю зруйноване вибухом побутового газу, в результаті

чого могли загинути десятки людей. Причиною стало неналежне з'єднання залізобетонних панелей. Комісія, яка розслідувала причини цієї трагедії, вперше запропонувала «узаконити» обов'язкові розрахунки для певних типів будівель для перевірки стійкості до прогресуючого обвалення наслідком чого у Британських кодексах з'явилися перші вимоги та заходи щодо запобігання прогресуючого обвалення.

Однією з найсерйозніших трагедій прогресуючого обвалення стали терористичні атаки 11 вересня 2001 року в Нью-Йорку, які зруйнували дві будівлі Всесвітнього торгового центру. Прогресуюче обвалення цих двох унікальних будівель відбулося в результаті трьох специфічних впливів – удару, вибуху і пожежі, які діяли в поєднанні майже одночасно, проте кожна з цих дій розглядалася та розраховувалася окремо при проектуванні торгових центрів.

В містах України найбільш поширені радянські цегляні будинки 50–80-х років та панельні будинки 70–80-х років минулого століття. Ці старі будівлі не були спроектовані таким чином, щоб протистояти прогресуючому обваленню, що було доведено трагічними подіями, які призвели до загибелі людей та значних руйнувань. Як приклад, у 2021 році, у Новій Одесі, Миколаїв, вибух побутового газу в одному з п'ятиповерхових житлових будинків зруйнував четвертий і п'ятий поверхи, в результаті чого одна людина загинула і шестеро отримали поранення. Масштаби обвалу були зумовлені високим надлишковим тиском вибуху та відсутності з відповідною міцністю з'єднання між панелями.

Ситуація в сучасних будівлях набагато краща: 26 лютого 2022 року потужна ракета влучила у багатоповерхівку на рівні 17–20 поверхів біля київського аеропорту «Жуляни», що призвело до часткового руйнування будівлі. Одна з опорних конструкцій була повністю зруйнована і декілька зазнали значних пошкоджень. Будівля вистояла і не

зруйнувалася навіть після досить сильного ракетного обстрілу. Це свідчить про те, що будівля була побудована відповідно до сучасних будівельних норм, які, ймовірно, враховують аспекти прогресуючого обвалення, а також сейсмічні навантаження.

Постає нове завдання — забезпечення належного рівня опору будівель прогресуючому обваленню, зумовленому дією надзвичайних впливів, серед яких особливу небезпеку становлять пожежі, вибухи, їх комбінація.

Актуальність проведення досліджень в цьому напрямку, безпосередньо пов'язані з виконанням вимог ДБН В.1.1–7:2016 "Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги", ДБН В.1.2–14:2018 "Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд" вимогами яких для будівель, що мають клас наслідків (відповідальності) СС3 та СС2 (значні та середні наслідки), передбачається проведення обов'язкового розрахунку на стійкість до прогресуючого обвалення внаслідок пожежі, а чинні положення імplementованих Єврокодів визначають окремо, додаткову вимогу до вимог з проєктування конструкцій, за яких би виключалась можливість прогресуючого обвалення в тому числі і в результаті вибуху усередині приміщень [2].

Вирішення зазначеного завдання є неможливим без розробки або вдосконалення існуючих методик розрахунку будівель із залізобетонних конструкцій з урахуванням змін фізико-механічних характеристик матеріалів та конструктивної схеми внаслідок дії пожежі, вибуху або їх комбінації [3, 4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Серед різних підходів до оцінки стійкості будівель до прогресуючого обвалення, методи, що базуються на оцінці ризиків, в основному використовуються в ситуаціях, коли рівень експлуатації несучої конструкція виходить за межі її нормальної експлуатації. Крім того, можуть бути використані й інші підходи. Наприклад, Еллінгвуд та Лейендекер у своїх оглядах практик зменшення ймовірності прогресуючого обвалення будівель, наводять і описують три методи, впорядковані за рівнем аналітичної складності [5]. Ці методи класифікуються як: непрямі методи розрахунку, аналіз питомого місцевого опору та аналіз альтернативного шляху навантаження. Останні два широко відомі як прямі методи розрахунку. Варто зазначити, що терміни «непрямий розрахунок» і «прямий розрахунок» були введені Еллінгвудом і Лейендекером у 1978 році. Основна відмінність непрямого підходу від прямого полягає в тому, що в першому випадку стійкість припускається, а в другому – демонструється [6].

Загальний підхід до розрахунку прогресуючого обвалення керівних документів США та країн Європейського Союзу, не враховують і не розглядають першопричину початкового локального руйнування, використовують три основні методи:

метод тягових сил, метод альтернативного шляху перерозподілу навантаження та метод підвищення локальної стійкості:

- метод тягових сил базується на використанні з'єднань між елементами конструкції для забезпечення їх цілісності при виникненні локального руйнування заснований на використанні з'єднань між елементами конструкції, що забезпечують їх цілісність при місцевому руйнуванні;

- альтернативний метод базується на використанні різних способів та підходів забезпечення розподілу навантаження у випадку локальних збоїв;

- метод підвищення місцевої стійкості ґрунтуються на розвитку міцності певних елементів конструкції, які можуть бути змушені працювати понад свою нормальну міцність у разі локального руйнування.

Будівельні норми та стандарти повинні передбачати своїми вимогами розрахунок та враховування впливу випадкових позапроєктних навантажень, щоб запобігти прогресуючому обваленню. Однак важко визначити кількісні вимоги до проєктування конструкцій через велику різноманітність структурних типів і труднощі з визначенням інтенсивності подій, що викликають обвалення. Тому в положеннях з проєктування пропонуються стандартні методи, які можна застосувати для покращення міцності конструкцій [7].

Загалом положення щодо покращення безперервності та пластичності конструкцій, підвищують загальну стійкість до прогресуючого обвалення, подібно до сейсмостійкої конструкції [8, 9].

Після обвалу Ronan Point (1968) будівельні принципи Великобританії наполягали на запобіганні прогресуючому обваленню будівлі шляхом врахування додаткових елементів, достатньої міцності та зв'язування між собою елементів будівлі [10]. Принципи документів Сполучених Штатів Америки передбачають «загальну структурну цілісність» для будівлі, щоб протистояти прогресуючому обваленню, де структурна цілісність досягається безперервністю, надмірністю та пластичністю [11].

Часткове руйнування будівлі Murrah Federal Building і руйнування торговельних центрів у Сполучених Штатах Америки, призвело до значного перегляду проєктних рекомендацій у країні [12–14]. Керівні принципи проєктування майбутніх державних і оборонних будівель були сформульовані у відповідь на вище вказані інциденти [15, 16]. Американський ASCE 7–98 зазнав перегляду у 2002 та 2017 роках, підкреслюючи потребу в міцності конструкцій для підвищення загальної стійкості будівель проти прогресуючого обвалення [17].

Національний будівельний кодекс Канади розглядає вимоги щодо міцності [18, 19]. Австралійський кодекс обговорює необхідність безперервності та пластичності конструкцій будівель

для покращення стійкості до прогресуючого обвалення [20]. У Китаї попередні рекомендації були зосереджені на запобіганні прогресуючому обваленню внаслідок локальних відмов [21]. Згодом був розроблений спеціальний кодекс для проектування проти обвалення будівельних конструкцій, який описує додаткові методи проектування для запобігання обвалу [22]. Слід зазначити, що лише обмежена кількість інструкцій надає вичерпний перелік запобіжних заходів щодо прогресуючого обвалення.

Стандарт ASCE Standard 7–16 наголошує на необхідності забезпечення структурної безпеки від екстремальних навантажень, що виникають внаслідок аварій, диверсій та нецільового використання [23]. Методи прямого проектування, який містить в собі методи альтернативного шляху (APM) і метод специфічного локального опору (SLRM), розглядають стійкість до прогресуючого обвалення на етапі проектування. APM запобігає глобальному руйнуванню, використовуючи альтернативні шляхи навантаження, тоді як SLRM забезпечує достатню міцність у критичних точках, щоб запобігти прогресуючому обваленню. З іншого боку, непрямий метод частково враховує стійкість до прогресуючого обвалення, враховуючи мінімальні вимоги до міцності, пластичності та суцільності. Стандарт ASCE Standard 7–16 надає вказівки щодо збереження структурної цілісності, підкреслюючи важливість пластичності, великих деформацій і високого поглинання енергії з'єднань під екстремальними навантаженнями. Однак ці вимоги не визначені кількісно в положеннях стандарту ASCE Standard 7–16.

Національна програма зменшення небезпеки землетрусів (NEHRP) надає сейсмічні правила для конструкцій [24], які включають положення щодо проектування будівель проти прогресуючого обвалення. NEHRP рекомендує будівництво резервних додаткових конструкцій для встановлення альтернативних шляхів навантаження, які можуть запобігти обваленню. У каркасних конструкціях включення моментних опорних з'єднань у сейсмічних силових системах підвищує як стійкість до вертикального навантаження, так і стійкість до поступового руйнування, забезпечуючи структурну надмірність.

При визначенні ймовірності прогресуючого обвалення FEMA–426 [25] наголошує на важливості врахування локальних компонентів, а також загальної стійкості будівлі. Документ також наводить короткий опис кореляції між прогресуючим обваленням і різними характеристиками конструктивних систем, включаючи шлях навантаження, резервування системи, пластичність і зв'язування.

Адміністрація загальних служб США (GSA) створила рекомендації щодо проектування [26] для розв'язання проблеми прогресуючого обвалення на стадіях проектування та будівництва нових будівель, а також проєктів реконструкції. Відповідно до GSA, конструкції можна оцінити на предмет їх схильності

до прогресуючого обвалення за допомогою лінійних або нелінійних методів. Лінійний метод передбачає спрощений підхід із використанням статичного або динамічного пружно–пластичних методів скінчених елементів. З іншого боку, нелінійна процедура є більш просунутим підходом, який використовує статичний динамічний пружно–пластичний метод скінчених елементів, враховуючи матеріальну та геометричну нелінійність.

GSA рекомендує незалежну від видів небезпек методологію для пом'якшення прогресуючого обвалення, яка зосереджена на запобіганні колапсу в результаті локального збою незалежно від надмірних навантажень.

Резервування відіграє вирішальну роль у зниженні ймовірності поширення відмови, забезпечуючи альтернативні шляхи навантаження та численні місця деформації у разі локалізованого пошкодження.

Три методи підвищення стійкості до прогресуючого обвалення обговорюються в Уніфікованих критеріях об'єктів (UFC) Міністерства оборони США. Такими методами є метод зв'язування, метод альтернативного шляху навантаження та метод покращеного місцевого опору (ELR). Підвищений місцевий опір (ELR) вимагає, щоб зазначені колони були розраховані таким чином, щоб забезпечити знижені коефіцієнти навантаження, а з'єднання цих колон з фундаментом і балками, розташованими вище, були здатні витримувати зусилля, що генеруються максимальною ймовірною міцністю колони.

NIST [27] узагальнює всі кодекси та стандарти та пропонує заходи для зменшення потенціалу прогресуючого обвалення для нових та існуючих споруд. Детальний огляд прямого методу (метод питомого локального опору і метод альтернативного шляху) і непрямого методу (посилення сили зв'язку) надається в NIST.

Загальна інформація проектування з урахуванням прогресуючого обвалення наведена ще в одному Британському стандарті BS 6399 [28], у той час, як конкретні положення для сталевих, бетонних та кам'яних конструкцій наведено в інших таких як BS 5950 [29], BS 8110 [30] та BS 5628 [31] відповідно. Загальний принцип заснований на використанні методу альтернативного шляху навантаження (периферійні зв'язки, вертикальні зв'язки).

Найбільше інформації містять Єврокоди (EN 1990, EN 1991, EN 1992, EN 1993, EN 1994, EN 1995, EN 1996, EN 1997, EN 1998, EN 1999 – сукупність європейських норм проектування та будівництва інженерних споруд. Так EN 1991–1–7 дає положення (стратегії та правила) для проектування будівель від означених і неозначених особливих навантажень. Однак, як зазначено в EN 1991–1–7 не розглядається конкретно випадкові дії, викликані зовнішніми вибухами, військовими діями та терористичною діяльністю, або залишковою стійкістю будівель чи інших цивільних інженерних споруд, пошкоджених сейсмічним впливом чи пожежею тощо [32].

У EN 1991–1–7 визначені основні стратегії для аварійних ситуацій проектування проілюстровані на рис. 3.1 даного документу. Якщо аварійний вплив виявлено, необхідно спробувати запобігти або зменшити вплив за допомогою захисних заходів, спроектувати конструкцію для достатньої міцності чи витримування впливу. З іншого боку, якщо припускається локальне пошкодження, то метою проектування є або посилення структурної надмірності за допомогою методу альтернативного шляху навантаження, або забезпечення структурної цілісності та пластичності.

EN 1990 визначає конкретні стратегії захисту від випадкових ситуацій проектування які залежать від класів наслідків будівель (CC1, CC2, CC3). EN 1991–1–7 наводить значення рекомендованих меж допустимих локальних пошкоджень/руйнувань, описує необхідність врахування комбінацій навантажень, розрахунок горизонтальних та вертикальних зав'язків, встановлює вимоги до ключових/відповідальних елементів руйнування яких призводить до прогресуючого обвалення.

Вітчизняний стандарт ДБН В.2.2–41:2019 [33], вимагає забезпечення механічного опору та стійкості висотних будівель від прогресуючого обвалення. Розрахунок на прогресуюче обвалення виконують шляхом видалення окремих конструкцій з конструктивної системи. При цьому зусилля у відповідних конструкціях (категорії А – конструкції та елементи, відмова яких може призвести до непридатності до експлуатації будівлі (споруди) або її частини), необхідно збільшувати на коефіцієнт динамічності не менше ніж 1,2. Площа поперечного перерізу всіх вилучених (демонтованих) вертикальних елементів, розташованих на ділянці 80 м², не повинна перевищувати для залізобетонних елементів 0,9 м², для фібробетонних, сталезалізобетонних елементів – 0,7 м², для жорсткої арматури та сталевих елементів – 15 %. Розрахунки виконують з урахуванням взаємодії конструкцій надземної і підземної частин будівлі та ґрунтової основи. При цьому визначають горизонтальне переміщення верху будівлі із урахуванням крену фундаменту, прискорення коливань перекриттів верхніх поверхів від вітрового навантаження, а також прогини перекриттів і зусилля в несучих елементах конструкцій. Зусилля від дії всіх можливих сполучень навантажень визначають з урахуванням пружних (або непружних) характеристик жорсткості елементів та стадійності зведення (монтажу) конструкцій.

Під час перевірки стійкості висотної будівлі до прогресуючого обвалення розрахунковий опір матеріалів приймають рівним їх характеристичним значенням, що відповідає умовам аварійного розрахункового навантаження. Для запобігання прогресуючому обваленню необхідно передбачати технічні рішення, які забезпечують нерозрізність конструктивної схеми будівлі. Це дозволяє здійснювати ефективний перерозподіл зусиль у разі пошкодження елементів конструкцій завдяки можливості розвитку значних пластичних

деформацій у самих елементах та їх з'єднаннях. У результаті це повинно забезпечити загальну просторову стійкість будівлі навіть у випадку локальних руйнувань, обмежуючи поширення обвалення на інші частини споруди.

Згідно з ДБН В.1.2–14:2018 [34], головні несучі конструкції будівель та споруд, що належать до класів наслідків (відповідальності) CC3 та CC2 — коли клас визначається з урахуванням загроз життю та здоров'ю людей, — мають проектуватися таким чином, щоб у разі аварійної ситуації зменшити ймовірність виникнення непропорційних (лавиноподібних) руйнувань. Зазначена вимога повинна реалізовуватися шляхом застосування одного або кількох із наступних інженерних заходів:

- виключення або попередження можливості появи початкових руйнувань (зокрема, за допомогою використання спеціальних заходів захисту);
- зменшення можливості руйнування відповідальних елементів об'єкта (зокрема, шляхом їх підсилення, дублювання, проектування їх здатними до сприйняття аварійних впливів);
- резервування несучої здатності головних несучих конструкцій, створення суцільності та безперервності конструкцій, підвищення пластичних властивостей в'язей між конструкціями, включення до роботи просторової системи ненесучих конструкцій;
- проектування об'єкта в цілому так, щоб у випадку руйнування будь-якого окремого елемента весь об'єкт або його найвідповідальніша частина зберігала експлуатаційну придатність певний період часу, достатній для вжиття термінових заходів (наприклад, евакуації людей при пожежі).

ДСТУ 9294 [35] який набрав чинність з 1 березня 2025 року визначає відповідний комплекс заходів для стійкості будівлі до прогресуючого (непропорційного) обвалення шляхом вжиття конструктивних заходів, спрямованих на забезпечення нерозрізненості й конструктивної цілісності системи з урахуванням пошкоджень та ефектів, які не враховують під час традиційного проектування (наприклад, мембранні зусилля в перекриттях, великі деформації та переміщення), розрахунком на аварійні комбінації навантажень і впливів, який охоплює вплив гіпотетичних локальних руйнувань несучих конструкцій.

Відповідно до наведених принципів які містить даний документ, захист будівлі від прогресуючого (непропорційного) обвалення забезпечено, якщо для будь-яких елементів і їхніх з'єднань виконано таку умову:

$$E_d \leq R_d, \quad (1)$$

де, E_d – розрахункова величина результату дій для прийнятої розрахункової ситуації;

R_d – розрахункова величина несучої здатності для прийнятої розрахункової ситуації.

Передбачає для проведення розрахунків розроблення найбільш небезпечних сценаріїв аварійних ситуацій, визначає рекомендовано зону

локального руйнування при розрахунках приймати площею не менше ніж 80 м^2 , перекриття будівлі повинне сприймати вагу ділянки перекриття вищого поверху з урахуванням динамічного впливу.

Для оцінювання стійкості будівель до прогресувального (непропорційного) обвалення вимагає розглядати найнебезпечніші локальні руйнування:

- вилучення (видалення) двох стін, що перетинаються, на ділянках від місця їхнього перетину (наприклад, від кута будівлі) до найближчого отвору в кожній стіні або до наступного вертикального перетину зі стіною іншого напрямку, або на ділянці, що дорівнює висоті поверху N у чистому вигляді в кожному напрямку;

- видалення стіни, що стоїть окремо: біля середини з короткого боку будівлі, біля середини з довгого боку, на куті будівлі від краю до найближчого отвору або на довжині, що дорівнює висоті поверху в чистому вигляді;

- обвалення (видалення) окремої колони;

- обвалення ділянки перекриття одного поверху на площі локального руйнування.

Площа поперечного перерізу кожного вилученого вертикального елемента, розташованого на ділянці локального руйнування, не повинна перевищувати: для залізобетонних елементів – $1,0 \text{ м}^2$; для фібробетонних, сталезалізобетонних елементів – $0,7 \text{ м}^2$.

Розрахунок на стійкість до прогресувального обвалення виконують у нелінійній постановці з урахуванням геометричної та фізичної нелінійності з урахуванням роботи елементів, які за нормальних умов експлуатації будівлі є ненесучими.

Визначає, що основним засобом захисту будівель від прогресуючого обвалення є забезпечення резервування несучої здатності ключових несучих елементів, таких як колони, ригелі, діафрагми жорсткості, диски перекриттів та конструктивні стики. Досягнення цієї мети передбачає:

- створення нерозрізності та безперервності армування плит перекриттів;

- підвищення пластичних властивостей в'язей між елементами конструкції;

- залучення до сумісної просторової роботи ненесучих конструктивних елементів (наприклад, заповнення, огорожень тощо), здатних обмежити розвиток локальних руйнувань.

В стандарті приведено алгоритм розрахунку приклад розрахунку багатоповерхової будівлі каркасно-монолітного типу із залізобетону на прогресуюче (непропорційне) обвалення за допомогою комп'ютерного моделювання методом скінченних елементів.

На відмінну від положень нормативних документів, вивчення механізму запобігання прогресуючого обвалення будівель різної конструктивної системи займалися науковці різних країн в тому числі й вітчизняні, з них слід виділити вітчизняних науковців таких як Шмуклер В.С., Бамбура А.М., Поздєєв С.В., Барабаш М.С.,

Ромашкіна М.А., Фесенко О.А. Всі вони вивчали питання прогресуючого обвалення, сталевих та залізобетонних будівель, оболонки спеціального типу в тому числі й при пожежі, при пожежі викликаної землетрусом, займалися розробленням кінематичного розрахункового методу прогнозування можливості прогресуючого обвалення. Початкову причину прогресуючого обвалення залізобетонних будівель внаслідок пожежі та внутрішнього дефлаграційного вибуху як окремий випадок не розглядали.

Так, аналіз закордонних кодексів і вітчизняних будівельних норм, стандартів, праць науковців вказує на те, що не існує стандартного підходу до розрахунків з оцінювання стійкості будівель до прогресуючого обвалення. Залежно від конкретної конструкції та бажаних обмежень на локальне обвалення можуть бути застосовані різні методи, зокрема, використання додаткових зв'язків, застосування альтернативних шляхів навантаження і посилення локального опору. При розрахунках стійкості будівель до прогресуючого обвалення приймається умовне видалення ключових елементів із розрахункової моделі та подальший аналіз, проте не враховується робота несучих конструкцій по зміні розрахункові схемі роботи будівлі при силових і високотемпературних чинників пожежі та внутрішнього дефлаграційного вибуху на ключові та інші відповідальні/несучі залізобетонні елементи будівель, руйнування яких які призводять до прогресуючого обвалення. Існуючі методики не описують можливу комбінацію впливу пожежі та внутрішнього дефлаграційного вибуху.

Формулювання мети статті

Метою роботи є підвищення рівня пожежної безпеки та стійкості залізобетонних будівель до прогресуючого обвалення внаслідок пожежі та внутрішнього дефлаграційного вибуху.

Для досягнення поставленої мети були визначені наступні завдання:

1. Аналіз сучасних методів та підходів розрахунку стійкості до прогресуючого обвалення;

2. Визначені критерії необхідні для проведення відповідних розрахунків;

3. Удосконалення методика розрахунку на стійкість залізобетонних будівель до прогресуючого обвалення внаслідок пожежі та внутрішнього дефлаграційного вибуху.

Виклад основного матеріалу

EN 1990 встановлює принципи та вимоги до безпеки, експлуатаційної придатності та довговічності споруд, описує основи їх проектування та перевірки, а також надає вказівки щодо аспектів надійності споруд.

Згідно з положеннями вище вказаного документу, вимагається, щоб конструкції були спроектовані та реалізовані з відповідною надійністю

та економічністю протягом їхнього визначеного життєвого циклу таким чином, щоб:

- витримували всі можливі дії та впливи під час будівництва та експлуатації;
- залишилися придатною для використання за призначенням.

Для конструкцій необхідно розрізняти граничні стани за вогнестійкістю, зокрема: втрата несучої здатності (R); втрата здатності чинити опір механічному удару (M). Оцінювання граничних станів має здійснюватися з урахуванням розрахункових ситуацій, до яких, окрім постійних, перехідних і випадкових, повинні також включатися особливі випадкові розрахункові ситуації, пов'язані з впливом пожежі, вибуху та локалізованого руйнування.

Для кожного випадку критичного навантаження розрахункові значення впливу дій (Ed) повинні визначатися шляхом формування комбінацій дій, які розглядаються як такі, що можуть відбуватися одночасно. Кожна комбінація повинна включати:

- провідну (основну) змінну дію – дію, яка найсуттєвіше впливає на результат (наприклад, експлуатаційне навантаження, сніг, вітер тощо);
- особливу випадкову дію – пожежу, вибух або комбінацію дій, пов'язану з наслідками локалізованого руйнування.

Загальний вигляд впливу дій повинен визначатися [33]:

$$E_d = E\{G_{k,j}; P; A_d; (\psi_{1,1} \text{ or } \psi_{2,1})Q_{k,1}; \psi_{2,i} Q_{k,i}\} j \geq 1; i > 1; \quad (2)$$

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + A_d + (\psi_{1,1} \text{ or } \psi_{2,1})Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (3)$$

Потенційне ймовірне руйнування повинно бути виключене або обмежено шляхом вибору одного або декількох з наступних заходів:

- уникнення, усунення або зменшення небезпек, яким може піддаватися будівля;
- вибір структурних форм, нечутливих до відповідної небезпеки;
- вибір структурних форм і конструкцій, які забезпечують достатню структурну цілісність при видаленні окремого елемента або обмеженої частини споруди, або при виникненні допустимої локальної відмови;
- вибір конструктивних форм і конструкцій, які забезпечують достатню цілісність конструкції у випадку допустимої локальної відмови;
- уникнення, наскільки це можливо, конструктивних систем, в яких може виникнути непередбачувана відмова;
- комбінації конструктивних елементів.

Згідно з Директивою Ради Європи 89/106/ЕЕС [36] та положеннями стандарту EN 1991-1-2 [37], при проектуванні будівель і споруд необхідно передбачати заходи для обмеження пожежних ризиків. Однією з ключових вимог є забезпечення здатності конструктивної системи зберігати несучу здатність упродовж визначеного проміжку часу в умовах впливу пожежі або вибуху.

Відповідно до методики, викладеної в ДСТУ 9294, повна аналітична методика розрахунку вогнестійкості конструктивної системи повинна враховувати роботу конструкції в умовах підвищених температур, тепловий вплив на матеріали та елементи конструкції, ефективність активних і пасивних систем вогнезахисту, невизначеності, пов'язані з кожним із цих чинників, ступінь відповідальності конструктивної системи, що відображає наслідки її можливого руйнування.

Такий підхід дозволяє забезпечити надійну оцінку вогнестійкості з урахуванням складної взаємодії між фізичними процесами, конструктивними особливостями та інженерними захисними заходами.

Розрахунок на стійкість до прогресуючого обвалення залізобетонних будівель внаслідок пожежі допускається виконувати у квазістатичній постановці.

За основу розрахунку на стійкість до прогресуючого обвалення залізобетонних будівель внаслідок пожежі та внутрішнього дефлаграційного вибуху взято положення будівельного розрахунку ДСТУ 9294:2024 з додатковим урахуванням комбінації випадкових розрахункових ситуацій дефлаграційного вибуху (динамічне навантаження) та спричинена ним подальша пожежа чи навпаки.

Наведена нижче методика розрахунку конструкцій на стійкість до прогресуючого обвалення внаслідок пожежі та внутрішнього дефлаграційного вибуху стосується лише будівель із залізобетонних конструкцій.

Для розрахунків будівель на стійкість до прогресуючого обвалення переважно використовують комп'ютерні програмні комплекси, що розроблені на основі методу скінченних елементів. Для цього різновиду розрахунків важливими є можливості програми щодо реалізації фізичної та геометричної нелінійності, врахування динамічного ефекту від раптового руйнування елементів. Така можливість реалізовано в програмних комплексах ЛІРА-САПР, COSMOS-M, LS-DYNA, SOFISTIK та інші.

Методика розрахунків на стійкість до прогресуючого обвалення залізобетонних будівель внаслідок пожежі та внутрішньому дефлаграційному вибуху.

Повна аналітична методика розрахунку має враховувати роботу конструктивної системи (статичний розрахунок) за підвищених температур (теплотехнічний розрахунок) та додатковим динамічним навантаженням від внутрішнього дефлаграційного вибуху (динамічний розрахунок).

Методика розрахунків на стійкість до прогресуючого обвалення залізобетонних будівель внаслідок пожежі та внутрішньому дефлаграційному вибуху складається з декілька етапів:

1. Створення розрахункової моделі будівлі.

На цьому етапі створюється розрахункова модель будівлі, яка описує всі її конструктивні елементи: несучі стіни, перекриття, балки, колони, фундамент, ґрунт тощо.

Розрахункові моделі повинні враховувати залучення ненесучих елементів (наприклад, панелей навісних стін, парапетів, залізобетонних балконних огорожень, перегородок тощо) за нормальних умов експлуатації будівлі, які можуть долучатися при перерозподілі зусиль в елементах конструктивної системи в разі локального обвалення будівлі.

Створена модель, її конструктивні елементи, умови закріплення, переміщення, повинна відтворювати дійсні параметри роботи загальної розрахункової схеми та конструкцій окремо. Завдання контактної взаємодії різних груп елементів конструкцій, у тому числі і «самоконтакт».

Конструкції будівлі потрібно розраховувати як систему «земля–фундамент–будівля» з використанням програмних комплексів, які дають змогу враховувати фізичну й геометричну та конструктивну нелінійності.

2. Задання характеристик матеріалу конструкцій.

Конструкціям розрахункової схеми присвоюються розрахункові характеристики матеріалів які дорівнюють їхнім характеристичним значенням.

3. Задання навантаження.

До конструкцій будівель розрахункової моделі необхідно прикладати відповідні навантаження. Перелік аварійних навантажень і впливів та їхні комбінації, які має бути враховано під час розроблення сценаріїв аварійних розрахункових ситуацій, треба задавати відповідно до ДБН В.1.2–6.

Аварійні комбінації навантажень охоплюють постійні навантаження з граничним розрахунковим значенням, тривалі тимчасові з квазіпостійними значеннями та епізодичні (аварійні) навантаження – вплив гіпотетичних локальних руйнувань несучих конструкцій.

4. Побудова скінчено–елементної моделі.

На основі розрахункової моделі формується скінчено–елементна модель напружено–деформованого стану будівлі.

Обирається тип кінцевих елементів і їх жорсткості. Для врахування фізичної і геометричної нелінійності вибираються відповідні типи кінцевих елементів. При завданні жорсткостей необхідно врахування нелінійності параметрів роботи матеріалів конструкцій.

5. Перевірка адекватності розробленої моделі.

Після задання необхідних параметрів проводиться розрахунок моделі для перевірки деформованого стану моделі на адекватність роботи та перевірку на допустиме переміщення по осях. При перевищених значень відносних переміщень, необхідно відкоригувати схеми і зробити відповідний перерахунок та аналіз.

6. Розрахунок будівлі з локальним руйнуванням без пожежі.

У розрахункові схемі без локального руйнування відповідальних елементів, в місцях найбільших значень напружено–деформованого стану, видаляють по черзі один з вертикальних або горизонтальних несучих елементів за які відповідно до положень розділу 5 ДСТУ 9294 приймається:

1) вилучення (видалення) двох стін, що перетинаються, на ділянках від місця їхнього перетину (наприклад, від кута будівлі) до найближчого отвору в кожній стіні або до наступного вертикального перетину зі стіною іншого напрямку, або на ділянці, що дорівнює висоті поверху N у чистому вигляді в кожному напрямку;

2) видалення стіни, що стоїть окремо: біля середини з короткого боку будівлі, біля середини з довгого боку, на куті будівлі від краю до найближчого отвору або на довжині, що дорівнює висоті поверху в чистому вигляді;

3) обвалення (видалення) окремої колони;

4) обвалення ділянки перекриття одного поверху на площі локального руйнування.

Якщо місця найбільших значень напружено–деформованого стану декілька, слід розглядати інші сценарії локального руйнування.

У всіх випадках площа поперечного перерізу кожного вилученого вертикального елемента, розташованого на ділянці локального руйнування, не повинна перевищувати для залізобетонних елементів – $1,0 \text{ м}^2$.

Локальне руйнування несучих конструкцій за аварійної розрахункової ситуації не повинно призводити до прогресуючого обвалення будівлі або до руйнування суміжних конструкцій на площі, що перевищує максимально допустиму для всіх розглянутих сценаріїв.

Виконують розрахунок модифікованої конструктивної схеми з видаленням елементом і визначають напружено–деформований стан в елементах конструктивної системи, що виникає під

час локального руйнування (вилучення) несучого елемента.

Якщо в процесі перевірки критеріїв умову несучої здатності в будь-яких перерізах (вузлах, в'язях) не забезпечено, то виконують коригування модифікованої розрахункової схеми, в якій вилучають ці конструкції, та виконують перерахунок конструктивної системи й знову перевіряють умови несучої здатності в перерізах (вузлів, в'язей).

Якщо процес руйнування сусідніх несучих конструкцій не зупиняється, то потрібно вважати, що настає прогресуюче обвалення.

7. Налаштування скінчено-елементної моделі з урахуванням пожежі та внутрішнього дефлаграційного вибуху.

Приймається, що під дією пожежі та подальшого внутрішнього дефлаграційного вибуху будуть визначені раніше відповідальні елементи з найбільшими значеннями напружено-деформованого стану та інші несучі будівельні конструкції, обмежені протипожежними перешкодами в межах одного поверху.

Під час вибору місця потенційного виникнення пожежі та вибуху необхідно враховувати:

- особливості об'ємно-планувальних та конструктивних рішень об'єкту та розміщення технологічного обладнання;
- вид, кількість, спосіб розміщення та пожежонебезпечні властивості речовин і матеріалів, що перебувають в об'єкті;
- максимальний розрахунковий тиск вибуху, місця можливого вибуху, його тривалість, конструкції на які діє надлишковий тиск вибуху;
- наявність заходів щодо зменшення значень тиску вибуху (легкоскидні конструкції, віконні отвори);
- інші умови за які суттєво відображають/впливають на параметри пожежі та вибуху.

Час впливу на конструкції пожежі.

(Перший варіант) Час впливу на конструкції $t_{\text{вп}}$ становить, час від початку пожежі до повідомлення про пожежу в пожежно-рятувальний підрозділ, $t_{\text{пв}}$ хв (допустимо приймати 1 хв); $t_{\text{зб}}$ – час збирання особового складу пожежно-рятувального підрозділу за тривоги, хв (допустимо приймати 1 хв); $t_{\text{сл}}$ – час слідування пожежно-рятувального підрозділу на пожежу, хв (визначають згідно з ДСТУ 8767); $t_{\text{ор}}$ – час оперативного розгортання пожежно-рятувального підрозділу на пожежу, хв (допустимо приймати 1 хв, наказ МВС України від 20.11.2015 року № 1470), $t_{\text{звв}}$ – час на заходи зменшення вогневого впливу на несучі конструкції від пожежі.

$$t_{\text{вп}} = t_{\text{пв}} + t_{\text{зб}} + t_{\text{сл}} + t_{\text{ор}} + t_{\text{звв}} \quad (3)$$

(Другий варіант) Розрахунковий час пожежі приймається не менше ніж мінімальне значення класу вогнестійкості відповідальних/несучих елементів які піддаються тепловому впливу.

Значення надлишкового тиску вибуху.

Для спрощеного розрахунку керуючись положеннями додатка Д Єврокоду 1 [39] приймається правило «динамічне навантаження від вибуху діє з однаковою силою на всі конструкції».

Надлишковий тиск вибуху, його пікові значення вираховується та приймаються відповідно положень державних стандартів ДСТУ Б В.1.1–36:2016 та ДСТУ 9176:2022.

Якщо під дією розрахункової пожежі та внутрішнього дефлаграційного вибуху відбувається процес руйнування навколишніх несучих конструкцій який призводить до прогресуючого обвалення, вживаються відповідні протипожежні заходи та виконується перерахунок конструктивної системи до досягнення загальної стійкості будівлі.

Висновки

1. Проведений аналіз сучасних методів і підходів щодо розрахунку будівель на стійкість до прогресуючого обвалення, виявлені не вирішені задачі, поставлені завдання наукових досліджень.

2. Запропонована удосконалена методика дозволяє проводити розрахунки та оцінювати стійкість до прогресуючого обвалення будівель при дії високотемпературних впливів від пожежі та динамічного навантаження внутрішнього дефлаграційного вибуху.

Перспективи подальших розвідок

Створення за розробленою методикою чисельної моделі залізобетонної будівлі для можливості оцінювання стійкості при пожежі та вибуху.

Визначення на підставі аналізу масиву карток обліку пожеж, інших довідникових і статистичних даних, тривалість вогневого впливу на огорожуючі конструкції для житлових будинків, виробничих та складських будівель – $t_{\text{звв}}$.

Література

1. Отрош, Ю.А. Дослідження методик розрахунку прогресуючого обвалення [Текст] / Ю.А. Отрош, Р.І. Майборода, А.В. Ромін // Науковий журнал Механіка та математичні методи, 2023. – Вип. 2. – С. 25–40. <https://doi.org/10.31650/2618-0650-2023-5-2-25-40>
2. ДСТУ–Н Б EN 1990:2008 Єврокод. Основи проектування конструкцій. (EN 1990:2002, IDT) Київ: Технічний комітет з стандартизації «Арматура для залізобетонних конструкцій». – Режим доступу: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=24946
3. Skob Y., Dreval Y., Vasilchenko A., Maiboroda R. (2023). Selection of Material and Thickness of the Protective Wall in

- the Conditions of a Hydrogen Explosion of Various Power. *Key Engineering Materials (Volume 952)*. 121–129.
4. Maiboroda R., Zhuravskij M., Otrosh Y., Karpuntsov V. (2024). Determination of the Required Area of Easily Removable Structures to Protect Against Progressive Collapse. *Key Engineering Materials Vol. 1004*. 73–83
5. Ellingwood, B., Leyendecker E. (1978). Approaches for design against progressive collapse. *Journal of the Structural Division*, 104 (3). 413–423.
6. Ellingwood, R., Donald, O. (2005). Building design for abnormal loads and progressive collapse. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* 20.3. 194–205.
7. Starossek, U., Haberland, M. (2011). Approaches to measures of structural robustness. *Structure and Infrastructure Engineering* 7 (7–8). 625–631.
8. Gurley, C. (2008). Progressive collapse and earthquake resistance. *Practice Periodical on Structural Design and Construction* 13 (1). 19–23.
9. Hayes, J., Woodson, C., Pekelnicky, G., Poland, D., Corley W., Sozen, M. Can strengthening for earthquake improve blast and progressive collapse resistance?. *Journal of Structural Engineering* 131 (8). 1157–1177.
10. Minister of Housing and Local Government. (1990). *The Building (Fifth Amendment) Regulation*. The Structural Engineer, Volume 48, Issue 6.
11. Federal Housing Administration. (1971). *Provisions to prevent progressive collapse*. US Department of Housing and Urban Development (HUD), Federal Housing Administration (FHA). Provisions.
12. International Code Council. (2009). *International building code (IBC 2009)*, International Code Council.
13. American Society of Civil Engineers. (1998). *Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures (ASCE/SEI 7 – 98)*. Structural Engineering Institute of the ASCE.
14. American Society of Civil Engineers. (2002). *Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures (ASCE/SEI 7 – 02)*. Structural Engineering Institute of the ASCE
15. General Services Administration. (2013). *Alternate path analysis and design guidelines for progressive collapse resistance*. General Services Administration.
16. Department of Defense. (2016). *UFC 4–023–03: Unified Facilities Criteria (UFC)–design of buildings to resist progressive collapse*. Department of Defense.
17. American Society of Civil Engineers. (2017). *Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures*. Structural Engineering Institute of the ASCE.
18. National Research Council Canada. (1975). *National building code of Canada*. Associate Committee on the National Building Code, National Research Council.
19. National Research Council Canada. (1995). *National building code of Canada. Associate Committee on the National Building Code*. National Research Council.
20. Standards Australia International. (2002). *Structural Design Actions: General Principles*. Standards Australia International.
21. Unified standard for reliability design of building structures. (2001). *Ministry of Housing and Urban–Rural Construction of the People’s Republic of China*. Haidian District, Beijing, China.
22. China Association for Engineering Construction Standardization. (2014). *Code for anti-collapse design of building structures*. Beijing (China).
23. Ellingwood, B., Leyendecker, E. (1978). Approaches for design against progressive collapse. *Journal of the Structural Division* 104 (3). 413–423.
24. Council, Building Seismic Safety. (2001). *Recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures, Part 1: Provisions (FEMA 368) & Part 2: Commentary (FEMA 369)*. Council, Building Seismic Safety, Washington DC.
25. Department of Homeland Security. (2003). *Federal Emergency Management Agency, Reference Manual To Mitigate Potential Terrorist Attacks Against Buildings*. Government Printing Office.
26. GSA (General Services Administration). (2003). *Progressive collapse analysis and design guidelines, new federal office buildings and major modernization projects*. General Services Administration.
27. Ellingwood, B., Smilowitz, R., Dusenberry, D., Duthinh, D., Lew, H. and Carino, N. (2007). Best Practices for Reducing the Potential for Progressive Collapse in Buildings, NIST Interagency/Internal Report (NISTIR). *National Institute of Standards and Technology*, Gaithersburg, MD.
28. BS 6399: Loading for buildings: Part 1: Code of practice for dead and imposed loads. (1996). *British Standards Institute*.
29. BS 5950: Structural use of steelwork in building: Part 1: Code of practice for design – Rolled and welded sections. (2000). *British Standards Institute*.
30. BS 8110: Structural use of concrete: Part 1: Code of practice for design and construction. (2000). *British Standards Institute*.
31. BS 5628: Code of practice for use of masonry: Part 1: Structural use of unreinforced masonry. (1978). *British Standards Institute*.
32. Kokot, S., Solomos, G. (2012). *Progressive collapse risk analysis: literature survey, relevant construction standards and guidelines*. Ipsa: Joint Research Centre, European Commission.
33. ДБН В.2.2–41:2019 Висотні будівлі. Основні положення. Київ: Державне підприємство «Науково–дослідний інститут будівельного виробництва»; ТОВ «Український інститут сталевих конструкцій імені В.М. Шимановського». – Режим доступу: https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3074874197005042809?doc_type=2
34. ДБН В.1.2–14:2018 Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об’єктів. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд. Київ: Український науково–дослідний та проектний інститут сталевих конструкцій ім. В.М. Шимановського. – Режим доступу: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc–page.html?id_doc=78683
35. ДСТУ 9294:2024 Розрахунок будівель на стійкість до прогресуючого (непропорційного) обвалення. Київ: Технічний комітет стандартизації «Захист будівель та споруд» (ТК 304), Державне підприємство «Державний науково–дослідний інститут будівельних конструкцій». – Режим доступу: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc–page.html?id_doc=109531
36. Регламент (ЄС) № 305/2011 Європейського Парламенту та ради від 9 березня 2011 року, що встановлює гармонізовані умови для розміщення на ринку будівельних виробів та скасовує директиву ради 89/106/ЄС. Рада Європейських Співтовариств. – Режим доступу: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc–page.html?id_doc=59946
37. ДСТУ–Н Б EN 1991–1–2:2010 Єврокод 1. Дії на конструкції. Частина 1–2. Загальні дії. Дії на конструкції під час пожежі. Київ: ДП «Державний науково–дослідний інститут будівельних конструкцій». – Режим доступу: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc–page?id_doc=59054
38. ДСТУ 9176:2022 Пожежна безпека. Методи визначення параметрів легкоскридних конструкцій для приміщень та будинків. Основні положення. Київ:

Технічний комітет «Пожежна безпека та протипожежна техніка» (TK 25). – Режим доступу: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=97632

39. ДСТУ–Н Б EN 1991–1–7:2010 Єврокод 1. Дії на конструкції. Частина 1–7. Загальні дії. Особливі динамічні впливи (EN 1991–1–7:2006/A1:2014, IDT). Київ: Технічний комітет стандартизації «Металобудівництво» (TK 301). – Режим доступу: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=79571

References

- Otrosh, Y.A. Doslidzhennya metodyk rozrakhunku prohresuyuchoho obvalennya (2023). *Naukovyy zhurnal Mekhanika ta matematychni metody*. – Vyp. 2. – S. 25–40. <https://doi.org/10.31650/2618-0650-2023-5-2-25-40>
- DSTU–N B EN 1990:2008 Yevrokod. Osnovy proyektuvannya konstruksiy. (EN 1990:2002, IDT) Kyiv: Tekhnichnyy komitet z standartyzatsiyi «Armatura dlya zalizobetonnykh konstruksiy». – Rezhym dostupu: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=24946
- Skob Y., Dreval Y., Vasilchenko A., Maiboroda R. (2023). Selection of Material and Thickness of the Protective Wall in the Conditions of a Hydrogen Explosion of Various Power. *Key Engineering Materials (Volume 952)*. 121–129.
- Maiboroda R., Zhuravskij M., Otrosh Y., Karpuntsov V. (2024) Determination of the Required Area of Easily Removable Structures to Protect Against Progressive Collapse. *Key Engineering Materials Vol. 1004*. 73–83
- Ellingwood, V., Leyendecker E. (1978). Approaches for design against progressive collapse. *Journal of the Structural Division*, 104 (3). 413–423.
- Ellingwood, R., Donald, O. (2005). Building design for abnormal loads and progressive collapse. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* 20.3. 194–205.
- Starossek, U., Haberland, M. (2011). Approaches to measures of structural robustness. *Structure and Infrastructure Engineering* 7 (7–8). 625–631.
- Gurley, C. (2008). Progressive collapse and earthquake resistance. *Practice Periodical on Structural Design and Construction* 13 (1). 19–23.
- Hayes, J., Woodson, C., Pekelnicky, G., Poland, D., Corley W., Sozen, M. Can strengthening for earthquake improve blast and progressive collapse resistance?. *Journal of Structural Engineering* 131 (8). 1157–1177.
- Minister of Housing and Local Government. (1990). The Building (Fifth Amendment) Regulation. *The Structural Engineer*. Volume 48, Issue 6.
- Federal Housing Administration. (1971). Provisions to prevent progressive collapse. *US Department of Housing and Urban Development (HUD), Federal Housing Administration (FHA)*. Provisions.
- International Code Council. (2009). *International building code*. International Code Council.
- American Society of Civil Engineers. (1998). *Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures (ASCE/SEI 7 – 98)*. Structural Engineering Institute of the ASCE.
- American Society of Civil Engineers. (2002). *Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures (ASCE/SEI 7 – 02)*. Structural Engineering Institute of the ASCE
- General Services Administration. (2013). *Alternate path analysis and design guidelines for progressive collapse resistance*. General Services Administration.
- Department of Defense. (2016). *UFC 4–023–03: Unified Facilities Criteria (UFC)–design of buildings to resist progressive collapse*. Department of Defense.
- American Society of Civil Engineers. (2017). *Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures*. Structural Engineering Institute of the ASCE.
- National Research Council Canada. (1975). *National building code of Canada*. Associate Committee on the National Building Code, National Research Council.
- National Research Council Canada. (1995). *National building code of Canada*. Associate Committee on the National Building Code. National Research Council.
- Standards Australia International. (2002). *Structural Design Actions: General Principles*. Standards Australia International.
- Unified standard for reliability design of building structures. (2001). *Ministry of Housing and Urban–Rural Construction of the People's Republic of China*. Haidian District, Beijing, China.
- China Association for Engineering Construction Standardization. (2014). *Code for anti-collapse design of building structures*. Beijing (China).
- Ellingwood, B., Leyendecker, E. (1978). *Approaches for design against progressive collapse*. Journal of the Structural Division 104 (3). 413–423.
- Council, Building Seismic Safety. (2001). *Recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures, Part 1: Provisions (FEMA 368) & Part 2: Commentary (FEMA 369)*. Council, Building Seismic Safety, Washington DC.
- Department of Homeland Security. (2003). *Federal Emergency Management Agency, Reference Manual To Mitigate Potential Terrorist Attacks Against Buildings*. Government Printing Office.
- GSA (General Services Administration). (2003). *Progressive collapse analysis and design guidelines, new federal office buildings and major modernization projects*. General Services Administration.
- Ellingwood, B., Smilowitz, R., Dusenberry, D., Duthinh, D., Lew, H. and Carino, N. (2007). Best Practices for Reducing the Potential for Progressive Collapse in Buildings, NIST Interagency/Internal Report (NISTIR). *National Institute of Standards and Technology*, Gaithersburg, MD.
- BS 6399: Loading for buildings: Part 1: Code of practice for dead and imposed loads. (1996). *British Standards Institute*.
- BS 5950: Structural use of steelwork in building: Part 1: Code of practice for design – Rolled and welded sections. (2000). *British Standards Institute*.
- BS 8110: Structural use of concrete: Part 1: Code of practice for design and construction. (2000). *British Standards Institute*.
- BS 5628: Code of practice for use of masonry: Part 1: Structural use of unreinforced masonry. (1978). *British Standards Institute*.
- Kokot, S., Solomos, G. (2012). *Progressive collapse risk analysis: literature survey, relevant construction standards and guidelines*. Ispra: Joint Research Centre, European Commission.
- DBN V.2.2–41:2019 Vysotni budivli. Osnovni polozhennia. Kyiv: Derzhavne pidpriemstvo «Naukovo-doslidnyi instytut budivelnoho vyrobnytstva»; TOV «Ukrainskyi instytut stalevykh konstruksii imeni V.M. Shymanovskoho». – Rezhym dostupu: https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3074874197005042809?doc_type=2
- DBN V.1.2–14:2018 Systema zabezpechennia nadiinosti ta bezpeky budivelnnykh ob'ektiv. Zahalni pryntsyipy zabezpechennia nadiinosti ta konstruktivnoi bezpeky budivel i sporud. Kyiv: Ukrainskyi naukovo-doslidnyi ta proektnyi instytut stalevykh konstruksii im. V.M. Shymanovskoho. – Rezhym dostupu:

https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc--page.html?id_doc=78683

35. DSTU 9294:2024 *Rozrakhunok budivel na stiikist do prohresuiuchoho (neproportsiinoho) obvalennia*. Kyiv: Tekhnichniy komitet standartyzatsii «Zakhyst budivel ta sporud» (TK 304), Derzhavne pidpriemstvo «Derzhavnyi naukovo-doslidnyi instytut budivelnykh konstrukttsii». – Rezhyim dostupu:

https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc--page.html?id_doc=109531

36. Rehlament (IeS) № 305/2011 *Yevropeiskoho Parlamentu ta rady vid 9 bereznia 2011 roku, shcho vstanovliuie harmonizovani umovy dlia rozmishchennia na rynku budivelnykh vyrobiv ta skasovuie dyrektyvu rady 89/106/IeES*. Rada Yevropeyskykh Spivtovarystv. – Rezhyim dostupu:

https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc--page.html?id_doc=59946

37. DSTU–N B EN 1991–1–2:2010 *Yevrokod 1. Dii na konstrukttsii. Chastyna 1–2. Zahalni dii. Dii na konstrukttsii pid chas pozhezh*. Kyiv: DP «Derzhavnyi naukovo-doslidnyi instytut budivelnykh konstrukttsii». – Rezhyim dostupu:

https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc--page?id_doc=59054

38. DSTU 9176:2022 *Pozhezhna bezpeka. Metody vyznachennia parametriv lehkoskydnykh konstrukttsii dlia prymishchen ta budynkiv. Osnovni polozhennia*. Kyiv: Tekhnichniy komitet «Pozhezhna bezpeka ta protypozhezhna tekhnika» (TK 25). – Rezhyim dostupu:

https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc--page.html?id_doc=97632

39. DSTU–N B EN 1991–1–7:2010 *Yevrokod 1. Dii na konstrukttsii. Chastyna 1–7. Zahalni dii. Osoblyvi dynamichni vplyvy (EN 1991–1–7:2006/A1:2014, IDT)*. Kyiv: Tekhnichniy

komitet standartyzatsii «Metalobudivnytstvo» (TK 301). – Rezhyim dostupu:

https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc--page.html?id_doc=79571

Рецензент: д-р техн. наук, проф. О. Басманов, провідний науковий співробітник науково-випробувального відділу дослідження систем протипожежного захисту та пожежогасіння науково-дослідного центру досліджень та випробувань Інституту наукових досліджень з цивільного захисту Національного університету цивільного захисту України

Автор: МАЙБОРОДА Роман Ігорович
старший викладач кафедри пожежної профілактики у населених пунктах
Національний університет цивільного захисту України
E-mail – maiboroda.roman@gmail.com
ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3461-2959>

Автор: ОТРОШ Юрій Анатолійович
доктор технічних наук, професор, начальник кафедри пожежної профілактики у населених пунктах Національний університет цивільного захисту України
E-mail – yuriyotrosh@gmail.com
ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0698-2888>

RESEARCH ON THE METHODOLOGY FOR CALCULATING RESISTANCE TO PROGRESSIVE COLLAPSE OF BUILDINGS DUE TO FIRE AND EXPLOSION

R. Maiboroda, Yu, Otrosh

National University of Civil Protection of Ukraine.

The authors analyzed the current state of the ability to calculate the resistance of buildings to progressive collapse in the event of a fire and internal deflationary explosion. The analysis of the literature allowed to form the main principles and approaches used by leading countries of the world to calculate and prevent progressive collapse of buildings, such as the traction force method, the alternative load redistribution path method and the method of increasing local stability). It was determined that when calculating the resistance to progressive collapse, the conditional removal of key elements from the calculation model and further analysis is accepted, but the work of load-bearing structures according to the modified calculation scheme of buildings, the structural elements of which are operated under the influence of high-temperature factors of fire and internal deflagration load, and other responsible/load-bearing reinforced concrete elements of buildings, the destruction of which leads to the occurrence of progressive collapse, is not taken into account. Most calculations and studies have been conducted for buildings with steel structures, individual elements, and completely unstudied buildings made of reinforced concrete structures, which are quite common in Ukraine.

Existing methods do not describe the probability of the simultaneous impact of fire and internal deflagration explosion at different time points as the root cause of progressive collapse.

The authors of this work have developed and described an improved calculation method for the resistance to progressive collapse of reinforced concrete buildings due to fire and internal deflationary explosion, and have determined the criteria necessary for conducting the relevant calculations.

The researchers note that the proposed method allows for the assessment of both individual building structures and the building as a whole in terms of resistance to progressive collapse, which differs from existing ones by taking into account the influence of different design values of high temperatures and internal explosive load.

Keywords: progressive collapse, fire, internal deflagration explosion, off-design loads, disproportionate destruction.