

УДК 624

## ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДИК РОЗРАХУНКУ ПРОГРЕСУЮЧОГО ОБВАЛЕННЯ

Отрош Ю. А<sup>1</sup>., Майборода Р. І<sup>1</sup>., Рашкевич Н. В<sup>1</sup>., Ромін А. В<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>Національний університет цивільного захисту України

**Анотація.** Проведене моделювання прогресуючого обвалення будівель в умовах пожежі з використанням програмного середовища ЛІРА-САПР з метою підвищення рівня забезпечення пожежної безпеки.

Проаналізовані наукові праці та нормування вимог щодо прогресуючого обвалення будівель в умовах пожежі, причини виникнення прогресуючого обвалення в умовах пожеж, розглянуті сучасні методи та підходи до розрахунку прогресуючого обвалення в умовах пожежі в США та Україні. Встановлено, що на теперішній час не існує єдиної методики розрахунку на «прогресуюче обвалення». Забезпечення (розробка методики розрахунку) необхідного опору об'єктів прогресуючому обваленню при різних комбінованих особливих діях пожежі та вибуху є актуальним науково-практичним завданням.

Розроблена чисельна модель прогресуючого обвалення будівлі в умовах пожежі, яке може призвести до прогресуючого обвалення будівлі. Для цього, використаний програмний комплекс ЛІРА-САПР. Була створена скінчено-елементну модель трьох поверхового паркінгу. Застосоване диференційне рівняння теплопровідності, яка враховує радіаційно-конвективний теплообмін від газового середовища до обігрівних поверхонь колони, теплообмін теплопровідністю в колоні. Для моделі було визначено типи жорсткості та відповідні характеристики. В результаті чисельного моделювання було встановлено місце виникнення пожежі, наслідки від якої призведуть до втрати несучої здатності конструкцій, і, як наслідок, до втрати загальної стійкості будівлі паркінгу.

Встановлено, що підходи щодо збільшення площі армування мають місце при проектуванні будівель та споруд, проте взагалі не прийнятні при експлуатації вже побудованих будівель та при необхідності підвищення меж вогнестійкості залізобетонних конструкцій до нормованих значень.

**Ключові слова:** прогресуюче обвалення, пожежа, вибух, чисельне моделювання, ЛІРА-САПР.

## RESEARCH OF PROGRESSIVE COLLAPSING CALCULATION METHODS

Yu. Otrosh<sup>1</sup>, R. Maiboroda<sup>1</sup>, N. Rashkevich<sup>1</sup>, A. Romin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National University of Civil Defence of Ukraine

**Abstract.** Modeling of the progressive collapse of buildings under fire conditions was carried out using the LIRA-CAD software environment in order to increase the level of fire safety.

Scientific works and standardization of requirements for the progressive collapse of buildings in fire conditions are analyzed, the causes of progressive collapse in fire conditions, modern methods and approaches to calculating progressive collapse in fire conditions in the USA and Ukraine are considered. It has been established that currently there is no single methodology for calculating "progressive collapse". Ensuring (development of calculation methodology) the necessary resistance of objects to progressive collapse under various combined special effects of fire and explosion is an urgent scientific and practical task.

A numerical model of the progressive collapse of the building under fire conditions, which can lead to the progressive collapse of the building, has been developed. For this, the LIRA-SAPR



software complex was used. A finite-element model of a three-story parking lot was created. The applied differential equation of thermal conductivity takes into account radiation-convective heat transfer from the gas medium to the heating surfaces of the column, heat transfer by thermal conductivity in the column. Stiffness types and corresponding characteristics were determined for the model. As a result of the numerical modeling, the place of the fire was established, the consequences of which will lead to the loss of the load-bearing capacity of the structures, and, as a result, to the loss of the overall stability of the parking building.

It has been established that approaches to increase the area of reinforcement take place in the design of buildings and structures, but are generally not acceptable in the operation of already constructed buildings and in the case of the need to increase the fire resistance limits of reinforced concrete structures to standardized values.

**Keywords:** progressive collapse, fire, explosion, numerical modeling, LIRA-SAPR.

## 1 ВСТУП

З розвитком архітектури будівництва, появою нових будівельних матеріалів, інженерних машин, відбувається зведення різних за архітектурною складністю будівель, від висотних до незвичних та архітектурно-складних за конструкцією будівель. Такі будівлі переважно характеризуються перебуванням значної кількості людей.

В умовах пожежі, порушення загальної стійкості будівлі відбувається внаслідок втрати несучої здатності та руйнування окремих елементів. Небезпека обвалу несучих конструкцій, крім матеріального збитку, ставить під загрозу життя людей, які в ній перебувають, та рятувальників під час гасіння пожежі. У переважній більшості випадків руйнування конструкцій призводить до повного обвалення та знищення матеріальних цінностей.

Конструктивна схема будь-якої будівлі повинна забезпечувати його міцність і стійкість у випадку локального руйнування несучих конструкцій, спричинених пожежами та вибухами, як мінімум на час необхідний для повної евакуації людей.

Вперше з випадком прогресуючого обвалення людство зустрілося в 1968 році, коли внаслідок вибуху побутового газу було повністю зруйновано крило з житловими квартирами 22-поверхового будинку «Ronan Point» (Лондон), що призвело до загибелі десятків людей (рис. 1). Комісією по вивченню причин трагедії було запропоновано «узаконити», проведення обов'язкового розрахунку будівель деяких видів на протидію прогресуючому обваленню.



**Рис. 1.** 16 травня 1968 рік, Лондон, наслідки ефекту прогресуючого обвалення конструкцій житлового будинку після вибуху побутового газу в одній із квартир

11 вересня 2001 року в Нью-Йорку трапилася терористична атака літаками двох башт Всесвітніх торговельних центрів. Прогресуюче обвалення цих двох унікальних будівель відбулося внаслідок комбінованого характеру майже одночасно трьох особливих дій типу «удар-вибух-пожежа», а не окремо кожного, як це розглядалося при проектуванні і будівництві (рис. 2).



**Рис. 2.** 11 вересня 2001 року США. Руйнування світових торговельних центрів в результаті терористичного акту та ефекту прогресуючого обвалення

На території міст України, найбільшу кількість займають будинки радянської забудови 50-80-х років з цегли та панельні віком 70-80-х років минулого століття. Така стара забудова, як з'ясувалося, теж не розрахована на протидію прогресуючому обваленню, що підтверджується трагічними подіями із загибеллю людей і значними руйнуваннями.

13 жовтня 2007 року у багатоповерхівці панельного типу м. Дніпро стався вибух побутового газу. В результаті вибуху в одній із квартир відбулося порушення несучих елементів (панелей) та виник ефект прогресуючого обвалення. Зруйновано 10 поверхів, загинуло 24 людини (рис. 3).



**Рис. 3.** Ефект прогресуючого руйнування панельного будинку в результаті вибуху газу

Ситуація з цегляними будинками радянської забудови суттєво не відрізняється від панельних. Як приклад, у місті Нова Одеса на Миколаївщині, у кутовій частині п'ятиповерхового житлового будинку стався вибух побутового газу, внаслідок чого відбулося руйнування 4 та 5 поверху (рис. 4).





**Рис. 4.** Руйнування будинку внаслідок вибуху газу

Значно краще ситуація з будинками сучасної забудови. 26 лютого 2022 року в результаті влучання потужної ракети у висотну будівлю на рівні 17-20 поверхів поблизу аеропорту «Жуляни» м. Києва, відбулося руйнування та умовне «видалення» частини несучих конструкцій (рис. 5). Факт, що будівля встояла і не завалилась після досить потужного ракетного удару, свідчить про те, що її звели із дотриманням сучасних будівельних нормативів, враховували аспект прогресуючого обвалення.



**Рис. 5.** Наслідки влучання ракети у житловий 25 поверховий будинок

Перед фахівцями постає нове завдання – забезпечення необхідного опору об'єктів прогресуючому обваленню при різних комбінованих особливих діях пожежі та вибуху.

## 2 АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Основна мета роботи, представленої в [1], полягала у визначенні важливих параметрів для розрахунку конструктивних елементів до температурних та/або вибухових навантажень. Для проведення аналізу чутливості необхідно було розробити аналітичний метод точного розрахунку реакції елементів конструкцій на пожежі та вибухи, щоб можна було швидко виконати численні розрахунки зусиль. У цій роботі було зроблено певний шлях розгляду різних умов закріплення (типів опор) та прикладених навантажень.

В [2] розглянуті катастрофічні події в нафтовій промисловості, інциденти під час складних виробничих процесів, неправильне поводження з побутовими газовими установками та терористичні атаки. Вибух створює вибухову хвилю, яка створює екстремальне навантаження на сусідні конструкції, що спричиняє пошкодження та руйнування, а також може викинути уламки конструкцій. Обчислювальне моделювання розглянутої задачі було виконано з використанням пакету нелінійних кінцевих елементів Abaqus. Чисельні моделі були побудовані та перевірені з використанням даних існуючих польових експериментів. Результати чисельної перевірки в цьому дослідженні показали, що методи чисельного моделювання з використанням лише моделей пластичності Джонсона-Кука та масового пропорційного демпфування добре узгоджуються з даними польових випробувань. Однак у методах, використаних у цьому дослідженні, є обмеження, для яких необхідні подальші дослідження для перевірки інших теорій у цій галузі дослідження.

Основною метою цього дослідження [3] є чисельне моделювання поведінки, розробка моделей руйнування сталевих колон під ударними навантаженнями з використанням динамічного пакету скінчених елементів ABAQUS/Explicit. Запропоновано чисельну модель та перевірено на основі опублікованих експериментальних випробувань на повномасштабних сталевих колонах, які піддаються динамічним вибуховим навантаженням. Дослідження також представляє виведення та перевірку запропонованого аналітичного підходу для розрахунку критичного імпульсу вибуху, при якому сталева колона втрачає свою глобальну стійкість.

У [4] розглянутий розрахунок будівельних конструкцій для захисту від вуглеводневих пожеж і вибухів, необхідність розгляду низки питань, які зазвичай не розглядаються проектувальниками. Основні напрями, які охоплюються: дані про властивості матеріалів при підвищеній температурі; дані про властивості матеріалу з високою швидкістю деформації для використання у вибухостійкій конструкції; методи аналізу пожежі та вибуху.

Розділ [5] допомагає читачам зрозуміти небезпеку пожежі та вибуху, а також визначити хімічні властивості, пов'язані з займистістю та вибухонебезпечністю. Вибух привернув національну увагу до небезпеки горючого пилу в хімічній і сільськогосподарській промисловості

У [6] розглянуто, що пожежі, і вибухи є результатом реакцій горіння, де паливо та кисень реагують, іноді бурхливо та миттєво, виділяють велику кількість енергії.

У [7] розглянуто відповідність новому законодавству Великої Британії та ЄС щодо газової безпеки для хімічних заводів сьогодні є основним фактором, що впливає на їх проектування та роботу.

У [8] наведено застосування у криміналістиці – розслідування навмисних пожеж, спричинених злочинними порушеннями правил профілактики, вчинених з помсти, з метою приховування інших злочинів, шляхом вандалізму, внаслідок психічних розладів або у разі самозаймання в громадських місцях.

В [9] проаналізовано міжнародні та національні стандарти. Під час обговорення аудиту пожежної безпеки та встановлення перегородок обговорюються негативні наслідки проектів реконструкції перегородок на будівельні конструкції, пошкодження протипожежного відсіку, вплив на шляхи евакуації людей, проектування димовидалення та інші стаціонарні засоби протипожежного захисту.

У [10] розглянута поведінка будівель та конструкцій під час критичних подій. Тим не менш, проблема часто вирішується якісно багатьма чинними кодексами та правилами, проектувальники не можуть посилатися на конкретні методології для оцінки або досягнення структурної цілісності конструкцій. Термін структурна цілісність тут мається на увазі як здатність конструкції витримувати екстремальні дії, які безпосередньо впливають на структурну систему, без розвитку значного руйнування. У цій статті описано два основні методи досягнення структурної цілісності: підхід «знизу вгору», коли досліджуються наслідки відмов елементів, не враховуючи моделювання конкретної дії, яка могла їх спровокувати; і низхідний підхід, коли визначається реакція структури на конкретну випадкову дію.

Також проведений аналіз світового та вітчизняного досвіду з виникнення та попередження надзвичайних ситуацій на територіях, які зазнали ракетно-артилерійських уражень в контексті визначення небезпек ґрунтів. Наукова спільнота до небезпек, окрім хімічного забруднення, відносить фізичні порушення [11, 12].

Фізичні порушення ґрунту виникають через запечатування внаслідок будівництва оборонних споруд, копання траншей або тунелів, ущільнення внаслідок руху техніки та військ або утворення вирв від бомбардування [11].

В [12] зазначається, що фізичні порушення можуть призвести до зсувів та ерозії.

Визначено [13], що фізико-хімічні процеси призводять до закритичного збільшення небезпечних чинників, які у свою чергу призводять до локальних (у найгіршому сценарії до фонових) змін показників фізико-хімічних властивостей (стану) ґрунтів, носять довгостроковий характер небезпеки ґрунтового середовища та становлять небезпеку для населення та територій.

Вібраційний вплив здатен призвести до ущільнення ґрунту, витискання води, просідання поверхні, утворення порожнин. Температурний вплив – порушити термічний і водний режим ґрунтів, змінити гранулометричний та агрегатний склад [14]. Воєнні дії впливають на основи будівель та споруд, та можуть призвести до прогресуючого обвалення.

Враховуючи реалії військового часу постає нагальне питання підземного будівництва, а саме захисних споруд цивільного захисту. Для цього потрібно проводити дослідження порушень ґрунтів, які спричинені воєнними діями, та враховувати їх під час реконструкції, нового будівництва.

Отже, на теперішній час не існує єдиної методики розрахунку на «прогресуюче обвалення». Всебічне дослідження та оцінка дії різного роду не проектних та аварійних навантажень, комбінація їх впливу на будівельні конструкції різних типів будинків є вкрай необхідною умовою для розробки та удосконалення методики розрахунку «прогресуючого обвалення» будівель та споруд під час пожеж і вибухів є актуальним науковим завданням, особливо з врахуванням військового часу.

### **3 ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ**

Метою дослідження є моделювання прогресуючого обвалення будівель в умовах пожежі з використанням програмного середовища ЛПРА-САПР з метою підвищення рівня забезпечення пожежної безпеки.

Для досягнення поставленої мети потребували вирішення наступні завдання:



- провести аналіз наукових праць та нормування вимог щодо прогресуючого обвалення будівель в умовах пожежі, причини виникнення прогресуючого обвалення в умовах пожеж, розглянути сучасні методи та підходи до розрахунку прогресуючого обвалення в умовах пожежі в США та Україні;
- з метою дослідження вогнестійкості будівлі до прогресуючого обвалення розробити модель прогресуючого обвалення будівлі (на прикладі паркінгу) в умовах пожежі, що може призвести до прогресуючого обвалення будівлі.

## 4 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 4.1 Результати досліджень методів розрахунку прогресуючого обвалення

Прогресуюче руйнування об'єкту – це остання, лавиноподібна стадія кінетичного процесу послідовного накопичення пошкоджень або деформацій структурних елементів об'єкту, що приводять до втрати загальної стійкості і геометричної незмінності об'єкту в цілому, що розвивається в часі.

Один з найбільш відомих методів – це метод «Design of Structures to Resist Progressive Collapse», який був розроблений для використання військовими інженерами. В цьому методі розглядається необхідність застосування певних заходів для забезпечення стійкості будівлі після локального руйнування, а також відновлення інтегральності будівлі. Цей метод регламентується «Unified Facilities Criteria (UFC) 4-023-03 Design of Buildings to Resist Progressive Collapse [15]», який використовується для розрахунку стійкості будівель до прогресуючого обвалення. Цей метод вимагає визначення потенційних сценаріїв руйнування будівлі та застосування конструкційних заходів для забезпечення стійкості будівлі.

Також в США існує метод «General Services Administration (GSA) Progressive Collapse Analysis and Design Guidelines for New Federal Office Buildings and Major Modernization Projects», який використовується для розрахунку стійкості нових федеральних будівель та проєктів їх модернізації. В цьому методі розглядаються фактори, що можуть призвести до прогресуючого обвалення, та заходи, необхідні для запобігання таким ситуаціям.

У США також використовуються інші методи, які розробляє «Los Alamos National Laboratory (LANL) Method», який розглядає прогресуюче обвалення з точки зору механіки твердого тіла, та метод «FEMA 427, Primer for Design of Commercial Buildings to Mitigate Terrorist Attacks», який використовується для розрахунку стійкості будівель до терористичних атак [16].

Загальний підхід до розрахунків прогресуючого обвалення в США передбачає використання трьох основних методів: методу тягових сил, методу альтернативних шляхів та методу підвищеної місцевої стійкості:

- метод тягових сил, як і в Європейському союзі, базується на використанні з'єднань між структурними елементами, які забезпечують їхню інтегральність у разі локального руйнування. Однак у США підхід до розрахунків методом тягових сил визначається за допомогою FEMA P-751 Design Guide for Improving School Safety in Earthquakes, Floods and High Winds [17], яка передбачає застосування допоміжного програмного забезпечення та розрахунків;

- метод підвищеної місцевої стійкості в США базується на розробці міцності конкретних структурних елементів, які можуть бути вимушені працювати за межами своєї нормальної міцності при локальному руйнуванні. У США цей метод регулюється документами UFC 4-023-03 Design of Buildings to Resist Progressive Collapse та Unified Facilities Criteria (UFC) 4-023-07 Design to Resist the Effects of Accidental Explosions [18];

- метод альтернативних шляхів в США передбачає розгляд можливих шляхів для розподілу навантаження у випадку локального руйнування. Цей метод передбачає



використання трьох аналітичних процедур: лінійного статичного, нелінійного статичного та нелінійного динамічного аналізу. У США метод альтернативних шляхів регулюється документами UFC 4-023-03 Design of Buildings to Resist Progressive Collapse та Unified Facilities Criteria (UFC) 3-340-01 Design and Analysis of Hardened Structures to Conventional Weapons Effects [19].

В Україні у 2009 році набув чинності ДБН В.2.2-24:2009 «Будинки і споруди. Проектування висотних житлових і громадських будинків», де вперше визначено термін прогресуючого обвалення та наводиться методика розрахунку.

На теперішній час у зв'язку із скасуванням ДБН В.2.2-24:2009 та набрання законності ДБН В.2.2-41:2019 «Висотні будівлі. Основні положення» під терміном прогресуючого обвалення розуміється – обвалення будівлі внаслідок локального руйнування частини несучих конструкцій на одному чи декількох поверхах. Тобто поширення початкового місцевого руйнування у вигляді ланцюгової реакції від елемента до елемента, що в результаті завершується обваленням будівлі (або її частини висотою два та більше поверхів), що втратили опору внаслідок (місцевого) локального руйнування на будь-якому поверсі. Причиною руйнування може бути будь-яка з безлічі аварійних ситуацій, які не розглядаються в звичайному проектуванні.

З огляду на це та враховуючи вимоги ДБН В.1.1-12 та ДБН В.1.1-7 особливо актуальними постають проблеми забезпечення сейсмостійкості та вогнестійкості будівельних конструкцій, а також стійкості багатопверхових будівель до прогресуючого обвалення. У той же час землетруси, пожежі, сильні вітри, на які виконуються розрахунки будівель відповідно до будівельних норм, також не повинні призводити до прогресуючого обвалення.

Методика розрахунків на прогресуюче обвалення пропонується наступна:

– після формування розрахункової схеми з врахуванням граничних умов необхідно вказати типів кінцевих елементів і їх жорсткості. Для врахування фізичної і геометричної нелінійності вибираються відповідні типи кінцевих елементів (наприклад, 410, 442, 444). При завданні жорсткостей наголошується необхідність врахування нелінійності і задаються параметри матеріалу конструкції і параметри арматури;

– до розрахункової моделі прикладаються два завантаження: перше моделює постійні і тривалі навантаження на конструкцію, друге дозволяє врахувати коефіцієнт динамічності. Для цього до верхнього вузла зруйнованої колони необхідно докласти зусилля, що становить певну частину від зусилля в цій колоні, що виникає при дії навантажень з першого завантаження;

– за допомогою «Монтажних таблиць» моделюються стадії обвалення. Формується дві стадії. У першу входять всі елементи конструкції без виключення, в другу – всі, за винятком зруйнованої колони;

– для виконання нелінійного розрахунку системи з врахуванням процесу монтажу необхідно задати кількість нелінійних завантажень рівне кількості стадій монтажу. Для другого нелінійного завантаження необхідно враховувати попереднє завантаження.

#### **4.2 Результати моделювання прогресуючого обвалення в ПК «ЛІРА -САПР»**

Методику проведення чисельного моделювання і аналізу ситуації, що склалася, можна представити в наступному вигляді:

1. Оцінка жорсткісних характеристик, дійсних схем роботи і залишкових ресурсів несучої здатності конструктивних вузлів при миттєвому і тривалому типах навантаження в умовах нормальної експлуатації.

2. Оцінка зміни схеми роботи і жорсткісних характеристик конструктивних вузлів при дії підвищених навантажень і розвитку пластичних деформацій до виходу з ладу.

3. Оцінка впливу виявлених схем роботи вузлів на локальні зони конструкції.

#### 4. Оцінка відгуку споруди на введення можливих виявлених конструктивних змін.

Процеси деформації, руйнування і обвалення конструкцій будівельних конструкцій за своєю суттю є розвиненими сильно нелінійними процесами, що супроводжуються великими пластичними деформаціями і переміщеннями, контактною взаємодією між групами елементів, динамічними навантажуючими ефектами у момент відмови елементів конструкцій.

В світлі цього результати комплексного чисельного моделювання істотно залежать від вживаних методів вирішення складових завдань:

- нелінійні динамічні задачі;
- геометрично нелінійні задачі з великими переміщеннями;
- геометрично нелінійні задачі з великими деформаціями;
- фізично нелінійні задачі з розвинутою пластикою і накопиченням пошкоджень матеріалом;
- завдання контактної взаємодії різних груп елементів конструкцій, у тому числі і «самоконтакт»:

- ✓ побудувати скінчено-елементну модель напружено-деформованого стану будівлі паркінгу для автомобілів із залізобетонних конструкцій та скінчено-елементну модель елемента конструкції (колони) для визначення теплового навантаження;

- ✓ проаналізувати варіанти пожеж для дослідження вогнестійкості (стійкості) будівлі в залежності від місця виникнення та пожежного навантаження на вогнезахисні залізобетонні конструкції будівлі паркінгу;

- ✓ виявити найбільш уразливі конструкції, виключення яких із конструктивної схеми призведе до найбільших збитків при пожежі та в подальшому до втрати стійкості будівлі в цілому;

- ✓ провести оцінювання вогнестійкості вогнезахисних будівельних конструкцій за допомогою розробленої моделі:

- ✓ визначити розподіл температур по перерізу будівельної конструкції;
- ✓ перевірити несучу здатність будівельних конструкцій моделі (напружено-деформований стан із зміненими жорсткісними характеристиками від впливу на конструкцію підвищених температур пожежі);

- ✓ запропонувати заходи з підвищення меж вогнестійкості конструкцій за допомогою вогнезахисних покриттів з науково обґрунтованими параметрами.

- ✓ порівняти стійкість будівлі паркінгу до впливу високих температур пожежі з використанням вогнезахисних покриттів для підвищення меж вогнестійкості залізобетонних конструкцій і без використання.

Для дослідження прогресуючого обвалення змодельований 3-х поверховий паркінг являє собою монолітно-каркасну будівлю, яка виконана із монолітного залізобетону. Схема будівлі являє собою повний зв'язковий каркас, загальною місткістю на 124 парко місць під легкові автомобілі (рис. 6).

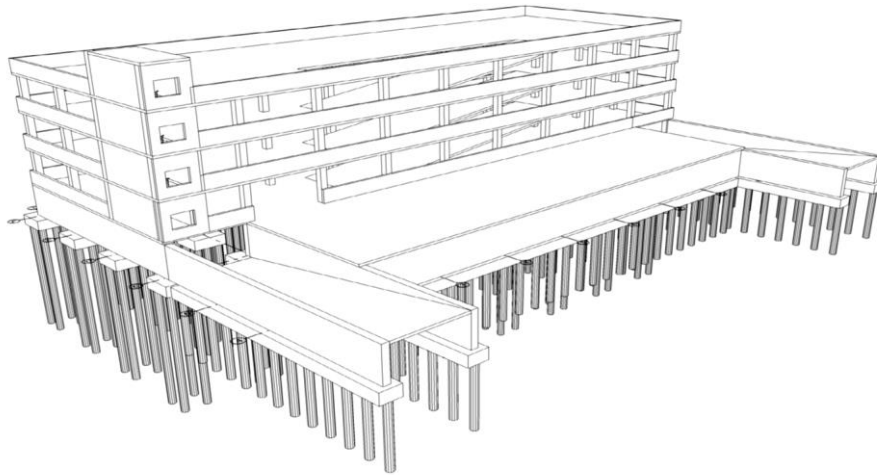


Рис. 6. Схема каркасу трьохповерхового паркінгу

На рис. 7 показано створену в програмному комплексі ЛІРА-САПР скінчено-елементну модель трьохповерхового паркінгу, задані навантаження на конструкції паркінгу.

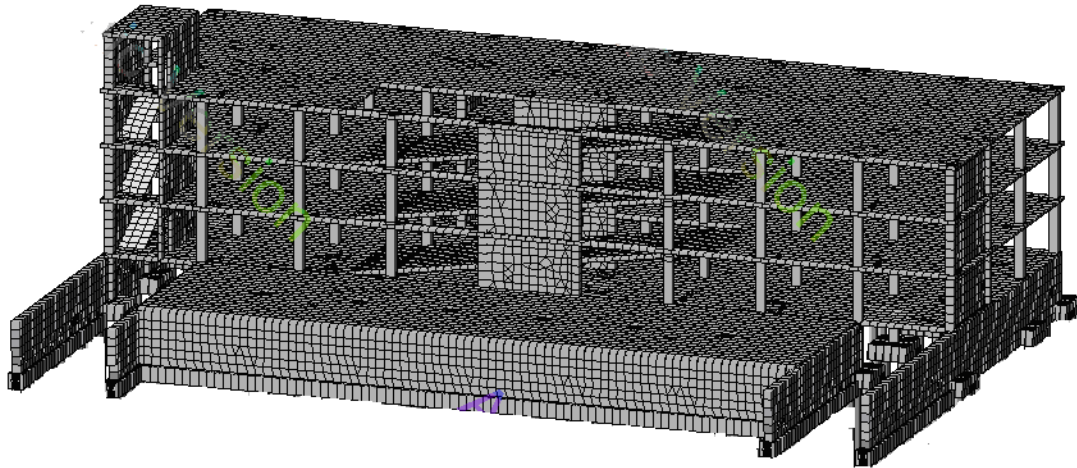


Рис. 7. Скінченно-елементна 3D модель трьохповерхового паркінгу

Змодельованим елементам скінченно-елементної моделі було призначено типи жорсткості, як зображено на рис. 7 та надані їх характеристики (табл. 1–4).

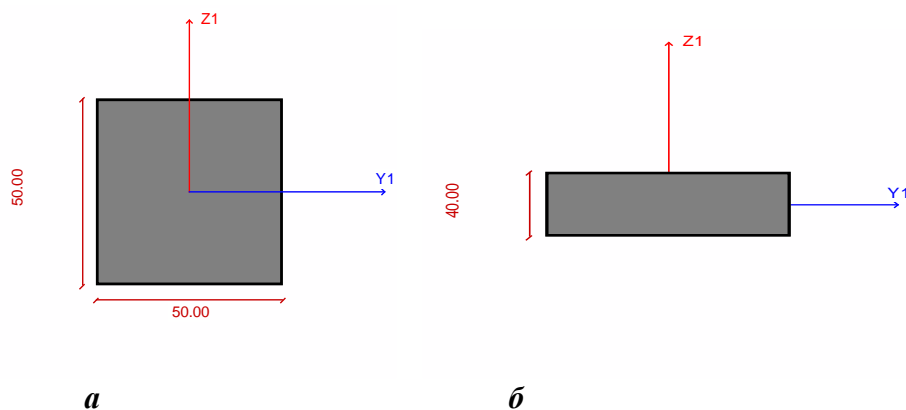


Рис. 7. Жорсткість колон «Брус 50 × 50» (а) та перекриттів «Пластина Н 40» (б)



**Таблиця 1**

Характеристики залізобетонних колон

Ім'я	Коментар	E, т/м <sup>2</sup>	R <sub>0</sub> , т/м <sup>3</sup>	EF, т	EI <sub>y</sub> , т·м <sup>2</sup>	EI <sub>z</sub> , т·м <sup>2</sup>	GI <sub>k</sub> , т·м <sup>2</sup>	Y1, см	Y2, см	Z1, см	Z2, см	q, т/м	GF <sub>y</sub> , т	GF <sub>z</sub> , т
Брус 50×50	Залізобетон колон	306·10 <sup>4</sup>	2,5	765000	15937	15937	11156	8,3	8,3	8,3	8,3	0,6	265625	265625

**Таблиця 2**

Жорсткісні характеристики плити перекриття

Ім'я	Коментар	E(E1), т/м <sup>2</sup>	R <sub>0</sub> , т/м <sup>3</sup>	V12(V)	H, см
Пластина Н 20	Залізобетон плит	2750000	2,5	0,2	20

**Таблиця 3**

Жорсткісні характеристики. Пластини (теплопровідність)

Ім'я	Коментар	H, см	K, Дж/(м·с·°С)	C, Дж/(кг·°С)	R <sub>0</sub> , Н/м <sup>3</sup>
Теплопровідність	Залізобетон	200	0.850	1100	23030
Теплопровідність	Вогнезахист	100	0.071	2000	5000

**Таблиця 4**

Жорсткісні характеристики. Стержні (конвекція)

Ім'я	Коментар	H, см	a, Дж/(с·м <sup>2</sup> ·°С)
Конвекція		100	25

В результаті чисельного моделювання було встановлено місце виникнення пожежі, наслідки від якої призведуть до втрати несучої здатності конструкцій, і, як наслідок, до втрати загальної стійкості будівлі паркінгу.

Для врахування нелінійності в програмному комплексі «ЛІРА-САПР» був обраний простий кроковий метод з кількістю кроків рівним 30. Обрано закон нелінійного деформування бетону, що застосовуються в програмному комплексі «ЛІРА-САПР»: 1501 – кусково-лінійний закон деформування.

Для розрахунків нерівномірних розподілів температури в поперечному перерізі залізобетонної колони застосовували математичну модель нестационарної теплопровідності, математичний апарат якої використано в програмі ЛІРА-САПР. Модель являє собою диференційне рівняння теплопровідності, яка враховує радіаційно-конвективний теплообмін від газового середовища до обігрівних поверхонь колони (обігрів з 4-ох сторін) (граничні умови III-го роду), теплообмін теплопровідністю в колоні. Для розв'язання рівняння теплопровідності використовувався метод скінчених елементів, реалізований в програмі ЛІРА-САПР.

## 5 ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

### 5.1 Обговорення результатів дослідження методів розрахунку прогресуючого обвалення

Різні нормативні документи можуть мати різні визначення прогресуючого обвалення, але вони мають спільні риси, які пов'язані з помилками при проектуванні,

невірним розрахунком навантажень та неврахуванням можливих впливів на будівлю під час експлуатації, таких як вибухи, пожежі тощо. Прогресуюче обвалення будівель під час пожежі становить особливу небезпеку.

Загальний підхід до розрахунків прогресуючого обвалення в США передбачає використання трьох основних методів: методу тягових сил, методу альтернативних шляхів та методу підвищеної місцевої стійкості. Кожен з цих методів має свої особливості та застосовується відповідно до конкретних умов. Застосування цих методів дозволяє забезпечити стійкість будівель після локального руйнування та зменшити наслідки можливих катастроф.

Методи та підходи до розрахунку прогресуючого обвалення в Україні за допомогою ПК ЛІРА-САПР включають квазістатичну постановку (лінійний та нелінійний розрахунок) та динамічну постановку (лінійний та нелінійний розрахунок). Основна мета такого розрахунку полягає у проектуванні споруд, які можуть протистояти аварійним ситуаціям, зменшуючи наслідки для людей та навколишнього середовища.

Дослідження за напрямком прогресуючого обвалення включає розгляд потенційних загроз, які можуть призвести до руйнування конструкції будівлі.

Таким чином, запобігання прогресуючому обваленню – одна з найважливіших умов безпечної експлуатації як новобудов, так і існуючих будівель. Згідно з вимогами ДБН В.1.2-14 та ДБН В.2.2-41 конструктивна система будівлі має забезпечувати опір прогресуючому обваленню та локальному руйнуванню у разі виникненні надзвичайних ситуацій.

## **5.2 Обговорення результатів моделювання прогресуючого обвалення в ПК «ЛІРА -САПР»**

Дослідження за напрямком прогресуючого обвалення включає розгляд потенційних загроз, які можуть призвести до руйнування конструкцій будівлі. Розроблена комп'ютерна модель для розрахунку на прогресуюче обвалення будівлі під впливом теплового та напружено-деформованого стану будівлі трьох поверхового паркінгу для автомобілів. Дане дослідження допомагає визначити найбільш слабкі місця конструкції паркінгу на прогресуюче обвалення, які потребують підсилення, а також розробити та впровадити відповідні заходи з покращення вогнестійкості конструкцій, встановлення систем пожежної сигналізації та автоматичного пожежогасіння, організація евакуаційних виходів та інші. При цьому обґрунтовано товщину пасивного вогнезахисного покриття.

## **6 ВИСНОВКИ**

1. На теперішній час не існує єдиної методики розрахунку на «прогресуюче обвалення». Всебічне дослідження та оцінка дії різного роду не проектних та аварійних навантажень, комбінація їх впливу на будівельні конструкції різних типів будинків є вкрай необхідною умовою для розробки та удосконалення методики розрахунку «прогресуючого обвалення» будівель та споруд під час пожеж і вибухів є актуальним науковим завданням, особливо з врахуванням військового часу.

Різні нормативні документи можуть мати різні визначення прогресуючого обвалення, але вони мають спільні риси, які пов'язані з помилками при проектуванні, невірним розрахунком навантажень та неврахуванням можливих впливів на будівлю під час експлуатації, таких як вибухи, пожежі тощо. Основна мета кожного методу полягає в забезпеченні стійкості будівлі та її захисту від локального руйнування шляхом розподілу навантаження та забезпечення міцності конструкцій.

Постає завдання забезпечення необхідного опору об'єктів прогресуючому обваленню при різних комбінованих особливих діях пожежі та вибуху.

2. Досліджуваний трьох поверховий паркінг є монолітно-каркасною будівлею, що виконана із монолітного залізобетону, які більш схильні до прогресуючого обвалення. Структура будівлі складається з колон та перекриттів, які утворюють повний зв'язковий каркас. У даному випадку, використовуючи програмний комплекс ЛІРА-САПР, було створено скінчено-елементну модель трьох поверхового паркінгу. Для моделі було визначено типи жорсткості та відповідні характеристики.

Під час дослідження вогнестійкості та стійкості будівлі до прогресуючого обвалення було змодельовано варіанти пожеж для визначення наслідків виникнення пожежі на конструкції паркінгу. В результаті чисельного моделювання було виявлено потенційне місце виникнення пожежі, що може призвести до прогресуючого обвалення.

3. Встановлено, що підходи щодо збільшення площі армування мають місце при проектуванні будівель та споруд, проте взагалі не прийнятні при експлуатації вже побудованих будівель та при необхідності підвищення меж вогнестійкості залізобетонних конструкцій до нормованих значень.

## Література

1. Walker S., Howarth M. Sensitivity of the response of structures to fires and explosions. HSE OTO 97 043. 2022. Available at: <https://www.fabig.com/external-publications/hse-oto-97-043/>.
2. Aikenhead K., Chernin L. Effect of debris impact on post-blast response of steel columns. In 1st International Conference on Structural Integrity for Offshore Energy Industry: Structural Integrity (SI) 2018 (Vol. ASRANet Ltd).
3. Al-Thairy H. Behaviour and Failure of Steel Columns Subjected to Blast Loads: Numerical Study and Analytical Approach. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2018. Available at: <https://doi.org/10.1155/2018/1591384/>.
4. Burgan B. A., Hamdan F.H., Barker D.D., Puskar F.J. Response of topside structures to fires and explosions: recent findings. In *International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. 2003, January. Vol. 36827. P. 155–162. Available at: <https://doi.org/10.1115/OMAE2003-37183>.
5. CCPS. Fire and Explosion Hazards. In book: *Process Safety for Engineers*. 2022. P.53–83. DOI: 10.1002/9781119831075.ch4
6. Houck M., Siegel J. Fires and Explosions. 2015. DOI: 10.1016/B978-0-12-800037-3.00018-2.
7. Nasr G. G., Connor N. Fire and Explosion. *Natural Gas Engineering and Safety Challenges*. 2014. P. 281–308. DOI: 10.1007/978-3-319-08948-5\_7
8. Aron I. Forensic Investigation of Fires and Explosions. *Bulletin of the Transilvania University of Braşov. Series VII: Social Sciences Law*. 2021. P. 143–148. DOI: 10.31926/but.ssl.2021.14.63.1.14
9. Wang Q., Zhang C. Fire safety analysis of building partition wall engineering. *Procedia engineering*. 2018. Vol. 211. P. 747-754. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.12.071.
10. Giuliani L. Structural safety in case of extreme actions. *International Journal of Lifecycle Performance Engineering*. 2012. Vol. 1. P. 22-40. DOI: 10.1504/IJLCPE.2012.051282
11. Certini G., Scalenghe R., Woods W.I. The impact of warfare on the soil environment. *Earth-Science Reviews*. 2013. Vol. 127. P. 1–15. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.08.009>
12. Broomandi P., Guney M., Kim J.R., Karaca F. Soil Contamination in Areas Impacted by Military Activities: A Critical Review. *Sustainability*. 2020. Vol. 12 (21). 9002. Retrieved from: <https://doi.org/10.3390/su12219002>
13. Рашкевич Н. В. Аналіз сучасного стану попередження надзвичайних ситуацій на територіях України, які зазнали ракетно-артилерійських уражень. *Комунальне господарство міст*. 2023. Том 4. Вип. 178. С. 232–251. DOI: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2023-4-178-232-251>



14. Сплідитель А., Голубцов О., Чумаченко С., Сорокіна Л. Забруднення земель внаслідок агресії росії проти України <https://ecoaction.org.ua/wp-content/uploads/2023/03/zabrudnennia-zemel-vid-rosii1.pdf>
15. UFC 4-023-03. Design of Structures to Resist Progressive Collapse. (Department of defense USA). 2005. 245 p. Available at: [https://www.wbdg.org/FFC/DOD/UFC/ufc\\_4\\_023\\_03\\_2009\\_c3.pdf](https://www.wbdg.org/FFC/DOD/UFC/ufc_4_023_03_2009_c3.pdf)
16. FEMA 427. Primer for Design of Commercial Buildings to Mitigate Terrorist Attacks. 2003. Available at: <https://www.fema.gov/sites/default/files/2020-08/fema427.pdf>
17. FEMA P-751. Design Guide for Improving School Safety in Earthquakes, Floods and High Winds. 2009. Available at: [https://www.wbdg.org/FFC/DHS/ARCHIVES/FEMA\\_P-751\\_NEHRP\\_Design\\_Examples\\_2009.pdf](https://www.wbdg.org/FFC/DHS/ARCHIVES/FEMA_P-751_NEHRP_Design_Examples_2009.pdf)
18. UFC 4-023-07. Design to Resist the Effects of Accidental Explosions. Department of defense USA. 2008. Available at: <https://www.wbdg.org/ffc/dod/unified-facilities-criteria-ufc/ufc-3-340-02>
19. UFC 3-340-01. Design and Analysis of Hardened Structures to Conventional Weapons Effects. Department of defense USA. 2002. Available at: <https://www.wbdg.org/ffc/dod/unified-facilities-criteria-ufc/ufc-3-340-01>

## References

1. Walker, S., Howarth, M. (2022). Sensitivity of the response of structures to fires and explosions. HSE OTO 97 043. Available at: <https://www.fabig.com/external-publications/hse-oto-97-043/>
2. Aikenhead, K., Chernin, L. (2018). Effect of debris impact on post-blast response of steel columns. In 1st International Conference on Structural Integrity for Offshore Energy Industry: Structural Integrity (SI) 2018 (Vol. ASRANet Ltd).
3. Al-Thairy, H. (2018). Behaviour and Failure of Steel Columns Subjected to Blast Loads: Numerical Study and Analytical Approach. *Advances in Materials Science and Engineering*. Available at: <https://doi.org/10.1155/2018/1591384>
4. Burgan, B. A., Hamdan, F. H., Barker, D. D., Puskar, F. J. (2003, January). Response of topside structures to fires and explosions: recent findings. In *International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 36827, 155–162. Available at: <https://doi.org/10.1115/OMAE2003-37183>
5. CCPS. (2022). Fire and Explosion Hazards. In book: *Process Safety for Engineers*, 53–83. DOI: 10.1002/9781119831075.ch4
6. Houck, M., Siegel, J. (2015). Fires and Explosions. DOI: 10.1016/B978-0-12-800037-3.00018-2
7. Nasr, G.G., Connor, N. (2014). Fire and Explosion. *Natural Gas Engineering and Safety Challenges*, 281–308. DOI: 10.1007/978-3-319-08948-5\_7
8. Aron, I. (2021). Forensic Investigation of Fires and Explosions. *Bulletin of the Transilvania University of Braşov. Series VII: Social Sciences Law*, 143–148. DOI: 10.31926/but.ssl.2021.14.63.1.14
9. Wang, Q., Zhang, C. (2018). Fire safety analysis of building partition wall engineering. *Procedia engineering*, 211, 747–754. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.12.071.
10. Giuliani, L. (2012). Structural safety in case of extreme actions. *International Journal of Lifecycle Performance Engineering*, 1, 22–40. DOI: 10.1504/IJLCPE.2012.051282
11. Certini, G., Scalenghe, R., Woods, W.I. (2013). The impact of warfare on the soil environment. *Earth-Science Reviews*, 127, 1–15. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.08.009>
12. Broomandi, P., Guney, M., Kim, J.R., Karaca, F. (2020). Soil Contamination in Areas Impacted by Military Activities: A Critical Review. *Sustainability*, 12 (21), 9002. Available at: <https://doi.org/10.3390/su12219002>
13. Rashkevich, N. (2023). Analysis of the current state of warning of emergency situations in the territories of Ukraine which were suffered by rocket and artillery impacts, 4, 178, 232–251. DOI: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2023-4-178-232-251>
14. Splidnyk, O., Holubtsov, O., Chumachenko, S., Sorokina, L. (2022). Zabrudnennya zemel' vnaslidok ahresiyi rosiyi proty Ukrayiny. Available at: <https://ecoaction.org.ua/wp-content/uploads/2023/03/zabrudnennia-zemel-vid-rosii1.pdf>

15. UFC 4-023-03. (2005). Design of Structures to Resist Progressive Collapse. (Department of defense USA), 245. Available at: [https://www.wbdg.org/FFC/DOD/UFC/ufc\\_4\\_023\\_03\\_2009\\_c3.pdf](https://www.wbdg.org/FFC/DOD/UFC/ufc_4_023_03_2009_c3.pdf)
16. FEMA 427. (2003). Primer for Design of Commercial Buildings to Mitigate Terrorist Attacks. Available at: <https://www.fema.gov/sites/default/files/2020-08/fema427.pdf>
17. FEMA P-751. (2009). Design Guide for Improving School Safety in Earthquakes, Floods and High Winds. Available at: [https://www.wbdg.org/FFC/DHS/ARCHIVES/FEMA\\_P-751\\_NEHRP\\_Design\\_Examples\\_2009.pdf](https://www.wbdg.org/FFC/DHS/ARCHIVES/FEMA_P-751_NEHRP_Design_Examples_2009.pdf)
18. UFC 4-023-07. (2008). Design to Resist the Effects of Accidental Explosions. Department of defense USA. Available at: <https://www.wbdg.org/ffc/dod/unified-facilities-criteria-ufc/ufc-3-340-02>
19. UFC 3-340-01. (2002). Design and Analysis of Hardened Structures to Conventional Weapons Effects. Department of defense USA. Available at: <https://www.wbdg.org/ffc/dod/unified-facilities-criteria-ufc/ufc-3-340-01>

**Отрош Юрій Анатолійович**

Національний університет цивільного захисту України  
д.т.н, професор  
вул. Чернишевська, 94, м. Харків, Україна, 61023  
yuriyotrosh@gmail.com  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0698-2888>

**Майборода Роман Ігорович**

Національний університет цивільного захисту України  
викладач  
вул. Чернишевська, 94, м. Харків, Україна, 61023  
maiboroda.roman@gmail.com; maiboroda.roman@ukr.net  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3461-2959>

**Рашкевич Ніна Владиславівна**

Національний університет цивільного захисту України  
доктор філософії зі спеціальності «Цивільна безпека»  
старший викладач  
вул. Чернишевська, 94, м. Харків, Україна, 61023  
nine291085@gmail.com  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5124-6068>

**Ромін Андрій Вячеславович**

Національний університет цивільного захисту України  
доктор наук з державного управління, професор  
вул. Чернишевська, 94, м. Харків, Україна, 61023  
romin@nuczu.edu.ua  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3974-6702>

*Для посилань:*

Отрош Ю. А., Майборода Р. І., Рашкевич Н. В., Ромін А. В. Дослідження методик розрахунку прогресуючого обвалення. Механіка та математичні методи, 2023. Т. V. № 2. С. 25–40.

*For references:*

Yu. Otrosh, R. Mayboroda, N. Rashkevich, A. Romin. (2023). Research of progressive collapsing calculation methods. Mechanics and Mathematical Methods. V(2). 25–40.