

УДК 624.012.45

**ПРО МЕТОД МОДЕЛЮВАННЯ ПРОГРЕСУЮЧОГО ОБВАЛЕННЯ
ЗАЛІЗОБЕТОННОГО КАРКАСА ПРИ ДІЇ ПОЖЕЖІ**

Асп. М. Альмохамад

**ABOUT THE METHOD OF SIMULATING THE PROGRESSIVE COLLAPSE
OF A REINFORCED CONCRETE FRAME UNDER THE FIRE IMPACT**

Postgraduate Student M. Almohamad

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.205.2023.288824>



Анотація. У роботі запропоновано метод, а на його базі обґрунтовано методуку моделювання прогресуючого обвалення каркасних залізобетонних будинків із використанням явного методу інтегрування рівнянь динаміки. Виконано чисельне дослідження монолітного залізобетонного каркаса при дії стандартного режиму пожежі. Обґрунтовано алгоритм визначення знижених механічних характеристик композитних шарів планарних скінченних елементів. Отримано результати у вигляді полів вертикальних переміщень, різке прирощування значень яких є ознакою настання прогресуючого обвалення споруди.

Ключові слова: прогресуюче обвалення, пожежа, тепловий вплив, метод скінченних елементів, переміщення.

Abstract. In his paper a method of mathematical modeling of progressive destruction based on the example of an existing 17-story building using an explicit method of integrating the dynamics equations was proposed. A set of provisions and assumptions was substantiated for mathematical modeling of the progressive destruction of the 17-story monolithic reinforced concrete frame. The numerical analysis was performed using the finite element method in the LS DYNA software complex. A fire under the standard mode (150 min – I degree of fire resistance) in accordance with Ukrainian standards was considered as an emergency load, which involves taking into account nonlinear processes of changes in physical and mechanical characteristics of materials and changes in temperature. Five scenarios of fire development in the premises of the building are considered, based on which the algorithm for determining the reduced mechanical characteristics of the composite layers of planar finite elements approximating the calculated area of the structural system of the building is substantiated. It is shown that in all cases of the five fire scenarios, progressive destruction covers parts and elements of the structural system of the building that go beyond the premises where the fire develops, as well as elements whose mechanical characteristics are not subject to reduction due to fire. The results demonstrating the destruction of the elements in a cascade manner which starts with the most weakened and spills over to the elements that perceive a greater load were obtained. It is noted that the elements that do not have reduced mechanical characteristics are destroyed due to the increase in bending moments from deformed overlaps with support columns and diaphragms, which have given rise to failure. As a sign of the onset of progressive collapse, a rapid increase in displacements is adopted. They spread both in plan and along the height of the building, and these displacements prevail by several orders over displacements obtained in normal (non-emergency) conditions. At the same time, the appearance of signs of progressive collapse became possible only when the load was increased by 3.72 times.

Keywords: progressive collapse, fire, thermal effect, finite element method, displacement.

Вступ. Основною особливістю руйнуючого впливу пожежі на конструкції, безумовно, є тепловий вплив, який має характер поступового нагрівання протягом порівняно тривалого проміжку часу, що у свою чергу призводить як до зменшення фізико-механічних характеристик матеріалів несучих конструкцій, так і появи додаткових температурних зусиль. Крім того, пожежа розвивається в межах певного приміщення і поширюється на інші приміщення після подолання перешкод у вигляді огорожувальних конструкцій. За усталеними підходами при ординарному розрахунку вогнестійкості тепловий вплив розглядається як рівномірний і однаковий на всі поверхні конструкцій, що безпосередньо прилягають до простору приміщення, де розвивається пожежа.

Також важливою особливістю при такому підході є використання для відтворення теплового впливу спеціальної температурної кривої пожежі, яку ще називають стандартною температурною кривою [1-3]. Така крива є логарифмічною і не має ділянки спадання температури. Тобто пожежа за таких умов може тільки розвиватися, а її усереднена температура тільки підвищуватися. Такий підхід є поширеним, не дивлячись на наявність інших ефективних інструментів, що дають змогу моделювати тепловий вплив безпосередньо, враховуючи наявні геометричні параметри приміщень, характеристики прорізів, матеріали огорожувальних конструкцій і пожежне навантаження. Разом з тим формалізований підхід дає змогу змоделювати аварійне

навантаження типу пожежі у відповідності з фізичними процесами та стандартним температурним режимом, що відповідає нормативним документам України [1].

Ще однією важливою особливістю, пов'язаною з прогресуючим обваленням унаслідок пожежі, є те, що поширення пожежі не обмежується з часом, а поступово перекидається на суміжні приміщення не тільки в межах поверху, а й на інші поверхи зверху та знизу. Основні особливості розвитку та поширення пожежі в будівлях схематично показано на рис. 1.

За таких умов прогресуюче обвалення відбудеться в певний момент часу обов'язково. Через це важливо обмежити часовий проміжок, у межах якого може бути оцінена можливість прогресуючого обвалення. У зв'язку з цим необхідно мати методику розрахунку можливості виникнення прогресуючого обвалення унаслідок теплової дії пожежі на будівельні конструкції, що враховує нелінійну зміну температури, поширення пожежі в будівлі, а також нелінійну зміну фізико-механічних характеристик.

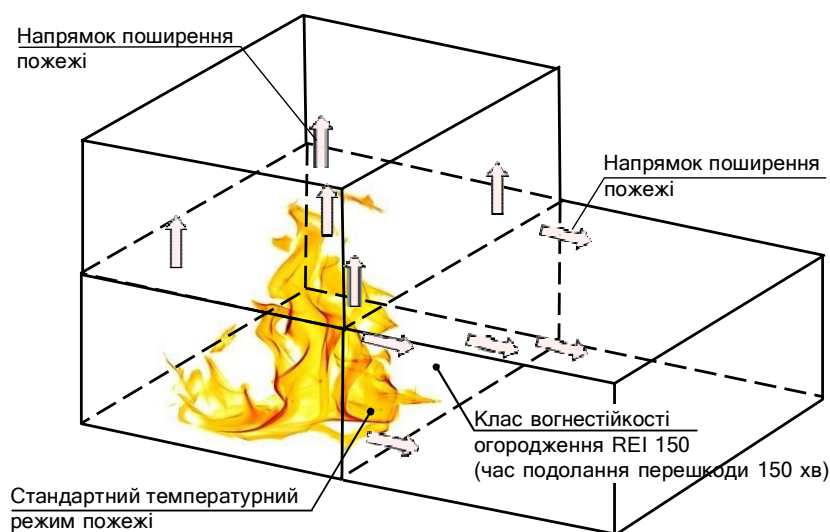


Рис. 1. Схема розвитку та поширення пожежі в будівлі

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Звертаючись до теми світового досвіду оцінювання прогресуючого обвалення будівель унаслідок впливу пожежі, слід зауважити, що наявні дослідження – теоретичні, чисельні та експериментальні – все ще не відповідають на всі проблемні питання. Так, зокрема, і українське нормативне поле на сьогодні досі не має затверджених нормативних документів, які б регламентували процедури, за якими мають працювати проєктувальники.

Якщо ж відзначити позитивний досвід чисельного аналізу будівель, то слід згадати роботу Цзянь Цзянь і Гуо-Цян Лі [4],

присвячену чисельному аналізу тривимірних сталевих каркасних конструкцій із залізобетонними перекриттями під час локальних пожеж. Аналіз, виконаний у програмному комплексі LS DYNA, базується на моделі восьмиповерхової будівлі, що імітує випробування в Кардінгтоні [5], з фокусом на різних сценаріях пожежі та співвідношеннях навантажень. Отримані результати свідчать про те, що квазістатична поведінка під час тривалої пожежі може бути ефективно змодельована в динамічному аналізі. Регулювання співвідношення навантаження демонструє вплив на поведінку обвалення,

підкреслюючи необхідність 3D-моделювання для точного його зображення. На критичну температуру руйнування помітно впливають локалізація пожежі та співвідношення навантажень. Загалом це дослідження надає цінну інформацію про поведінку конструкцій під час пожеж, проте тільки локально розташованих, і лише для сталезалізобетонних будівель.

У роботі Юнь Чжоу та ін. [6] відображені результати як експериментальних випробувань вузлів збірних каркасів, так і повірочний розрахунок методом скінченних елементів. Це дослідження фокусується на поведінці збірних залізобетонних каркасних будинків при прогресуючому обваленні за умови виконання рамних вузлів – сценарій, який досить рідко вивчався під час вибуху, пожежі або ударних навантажень від транспортних засобів. Дослідження проведені на напівмасштабних рамних вузлах сполучень колон і балок з порівнянням зі звичайними залізобетонними зразками з шарнірними вузлами. За результатами досліджень відзначено, що зразки з шарнірними вузлами продемонстрували нижчу пікову міцність, зменшене кінцеве переміщення та меншу пластичність порівняно зі зразками з рамними вузлами. Це дослідження висвітлює необхідність покращення характеристик конструкцій на випадок прогресуючого обвалення і пропонує цінну інформацію для практичного застосування.

Дослідження [7] демонструє аналіз механізмів обвалення залізобетонних конструкцій під впливом різних температур і способи підвищення вогнестійкості бетонних будівель. У той час, як попередні дослідження були зосереджені на виборі матеріалів і деталізації, ця робота підкреслює важливість взаємодії між цегляними заповнювачами стін і елементами каркаса залізобетонних конструкцій під час пожежі. Акцентується увага на необхідності врахування таких факторів, як навантаження, місце пожежі,

інтенсивність і тривалість при моделюванні впливу пожежі на повномасштабні житлові будинки. Пропонується використовувати скінченно-елементний аналіз для врахування комбінованого впливу навантаження і високої температури, а також дослідження перехідних станів для точного моделювання підвищення температури.

Підсумовуючи результати, отримані в перелічених роботах, слід зазначити, що робіт, присвячених оцінюванню прогресуючого обвалення монолітних каркасних будинків унаслідок аварійної дії пожежі з урахуванням наведених вище нелінійностей на сьогодні написано досить небагато. Оскільки проведення натурних експериментальних досліджень є дуже дорогим і непрактичним завданням з огляду на різноманіття каркасних монолітних будинків і діючих на них сполучень навантажень, відчувається об'єктивна необхідність у подальшому розвитку підходів чисельного моделювання напружено-деформованого стану (НДС) залізобетонних каркасів при дії пожежі та пошуках методів моделювання прогресуючого обвалення.

Визначення мети та завдання дослідження. *Метою цього дослідження є побудова методу моделювання прогресуючого обвалення каркасних будинків з монолітного залізобетону внаслідок дії пожежі, що реалізується шляхом динамічного чисельного аналізу та з урахуванням стандартного температурного режиму пожежі. Об'єкт дослідження – аналіз процесів поширення вогню та зміни напружено-деформованого стану монолітних залізобетонних каркасів при дії аварійних пожежних навантажень. Предмет дослідження – прогресуюче обвалення монолітних залізобетонних каркасних будинків внаслідок пожежі. Досягнення поставленої мети передбачає вирішення таких завдань:*

1. Обґрунтувати метод, а на його основі побудувати методику моделювання

прогресуючого обвалення каркасних монолітних будинків з використанням явного динамічного аналізу шляхом скінченно-елементного моделювання та врахуванням нелінійних процесів зміни фізико-механічних характеристик і зміни температури.

2. Проаналізувати компоненти напружено-деформованого стану системи та сценарії розповсюдження вогню з метою визначення ознаки настання прогресуючого обвалення будівлі.

Методика дослідження. У зв'язку з вищевикладеним пропонується така процедура оцінювання можливості прогресуючого обвалення будівлі внаслідок впливу пожежі:

1. Виділяється певне приміщення з огороженням із однаковим найбільшим класом вогнестійкості.

2. У межах виділеного приміщення влаштовуються всі несучі будівельні конструкції зі встановленим найбільшим класом вогнестійкості, який визначає час, протягом якого має бути виключена ініціація прогресуючого обвалення.

3. Розв'язується теплова задача для кожного з несучих елементів і визначаються знижені фізико-механічні характеристики залізобетонних конструкцій як наслідок їхньої деградації через тепловий вплив пожежі.

4. Складається загальна розрахункова схема каркаса будівлі з елементами зі зниженими характеристиками в межах виділеного приміщення.

5. Після прикладання всіх постійних і тимчасових навантажень згідно з діючими нормативними документами проводиться розрахунок такого каркаса з урахуванням фізичної та геометричної нелінійностей.

6. Фіксується настання або ненастання прогресуючого обвалення за наявністю «великих» переміщень системи. Оскільки при розрахунку на аварійні сполучення навантажень не висуваються вимоги щодо граничних значень переміщень, при виборі «великих»

переміщень, які будуть показувати настання прогресуючого обвалення, треба орієнтуватися на швидкість приросту переміщень на кожному кроці та слідкувати за перетворенням схеми в геометрично змінювану.

При реалізації розрахунку використано такі припущення та гіпотези:

- розрахунок можливості прогресуючого обвалення будівлі проводиться в момент часу впливу стандартного температурного режиму пожежі 150 хв (як найбільшого для будівель І ступеня вогнестійкості згідно з класифікацією ДБН В.1.1.7:2016 [1]) із урахуванням усіх постійних і тимчасових навантажень згідно з вимогами ДБН В.1.2-2:2006 [8] як для аварійного сполучення, тобто зменшенням їхніх значень [3, 8, 9]. У випадку ненастання швидкоплинних деформацій, що розповсюджуються на всю або значну частину будівлі, чи/або неперетворення моделі в геометрично змінювану корисні навантаження збільшуються до того моменту, як відмічена ознака прогресуючого обвалення не буде виконана;

- зменшення властивостей бетону та арматурної сталі відбувається при врахуванні теплового впливу пожежі тільки у приміщенні з пожежею з урахуванням наявності інших огорожувальних конструкцій;

- для встановлення знижених фізико-механічних характеристик арматурної сталі та бетону розв'язується теплова задача для кожного несучого елемента конструкції відповідно до рекомендацій [3, 9];

- для визначення НДС у конструкціях будівлі застосовується явний метод інтегрування загальних рівнянь динаміки при її апроксимації за методом скінченних елементів;

- як скінченні елементи розглядаються планарні елементи типу оболонки Беличко-Цая, параметри напружено-деформованого стану визначаються інтегруванням у кожній точці інтегрування за товщиною планарного елемента. Цей

елемент має шарувату композитну структуру для врахування положення шарів бетону та шарів із арматурою (рис. 2);

- кожен шар планарного елемента має знижені характеристики міцності залежно від температури нагрівання цього шару, що має усереднене значення в його межах;

- як модель матеріалу використовується модель бетону та арматурної сталі, розробленої спеціально для врахування настанов, що наведені в нормах [3]. Ці моделі враховують появу пластичних деформацій і їхній вплив при розвантаженні та повторному навантаженні конструктивних систем на основі кінематичної теорії пластичності, а також теорії міцності бетону з урахуванням появи тріщин у точках деформування та інтегрування планарних СЕ.

При вивченні прогресуючого обвалення будівлі використовується комп'ютерна система LS-DYNA.

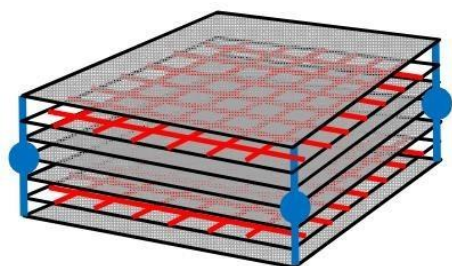


Рис. 2. Схема розташування шарів у планарному скінченному елементі

Основна частина дослідження. При моделюванні прогресуючого обвалення будівлі, зведеної на основі залізобетонних конструкцій, була використана модель залізобетону з властивостями, рекомендованими в настановах норм [3]. При цьому ця модель описує комплексно і бетон, і сталеву арматуру, процентне співвідношення між якими задається опціонально [10].

Для врахування зниження міцності арматурної сталі під час її нагрівання

початкова міцність помножується на коефіцієнт зниження міцності:

$$f_{sy,t}(\theta) = k_s(\theta) f_{yk,t}, \quad (1)$$

де $k_s(\theta)$ – коефіцієнт зниження міцності арматури залежно від температури.

Як модель матеріалу сталевій арматурі використовується матеріал, що враховує появу пластичних деформацій. Діаграми деформування такого матеріалу відповідають рекомендаціям другої частини Eurocode 2 [3], форма яких включає ділянку зростання, горизонтальну ділянку, а також спадну ділянку. При обчисленні нелінійних деформацій звичайної та попередньо напруженої арматурної сталі можна визначити зниження межі пропорційності залежно від температури.

Для визначення знижених характеристик міцності бетону в результаті його нагрівання початкова міцність помножується на відповідний коефіцієнт:

$$f_{ck,t}(\theta) = k_{c,t}(\theta) f_{ck,t}, \quad (2)$$

де $k_{c,t}(\theta)$ – коефіцієнт зниження міцності бетону залежно від температури.

При моделюванні прогресуючого обвалення будівлі, зведеної на основі залізобетонних конструкцій, було розглянуто багатоповерхову будівлю, наведену на рис. 3. Цей об'єкт являє собою 17-поверховий житловий будинок, виконаний у монолітному залізобетонному безригельному каркасі з такими перерізами конструктивних елементів: колони 400×400 мм, 400×800 мм, 400×700 мм, 400×600 мм; плити перекриттів товщиною 220 мм.

При дослідженні прогресуючого обвалення такої будівлі були розглянуті сценарії виникнення та розвитку пожежі в окремих приміщеннях, огорожених вогнестійкими огорожувальними конструкціями (цегляними стінами, клас вогнестійкості яких не менше REI 150). На рис. 4 наведені локації цих приміщень на плані першого поверху.



Рис. 3. Житловий комплекс «Америка» (м. Львів, Україна)

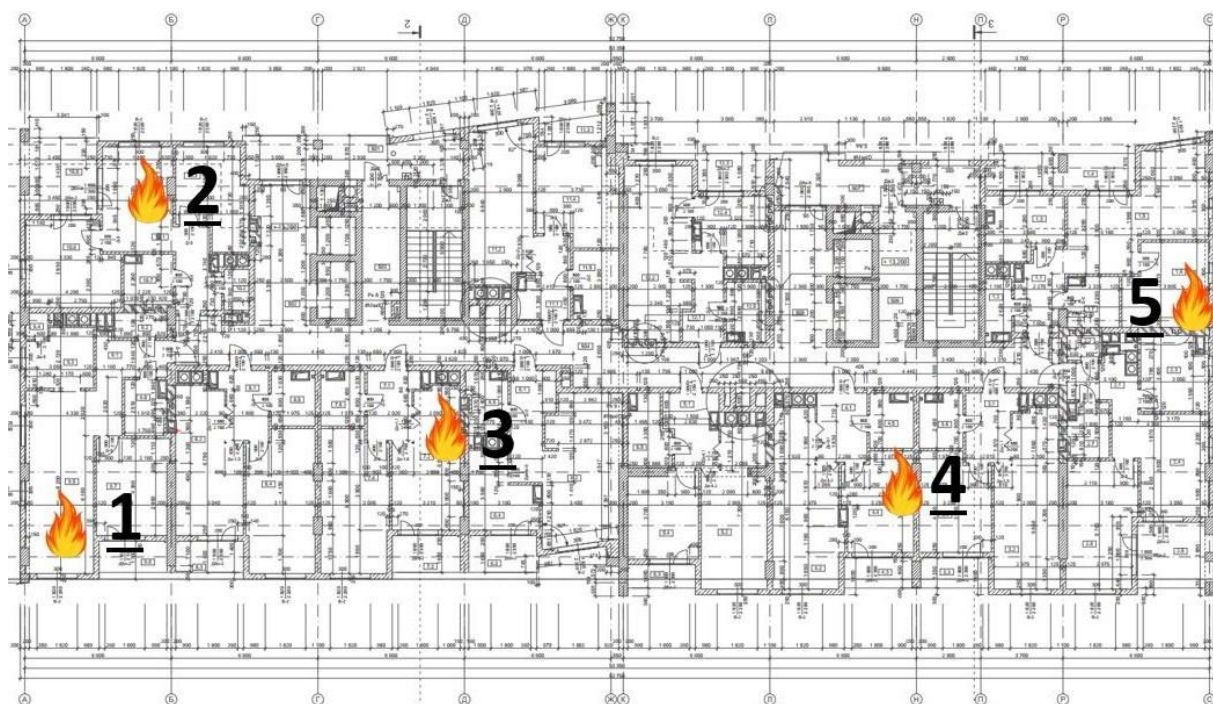


Рис. 4. Осередки виникнення пожеж на плані першого поверху

На рис. 5, а наведено конструктивну систему будівлі, що являє собою каркас будівлі у спрощеному вигляді, а також розрахункову модель у скінченно-елементній формі (рис. 5, б).

Використовуючи схему на рис. 4, було виділено елементи (рис. 6), характеристики міцності бетону і арматури яких буде знижено в результаті теплового впливу пожежі.

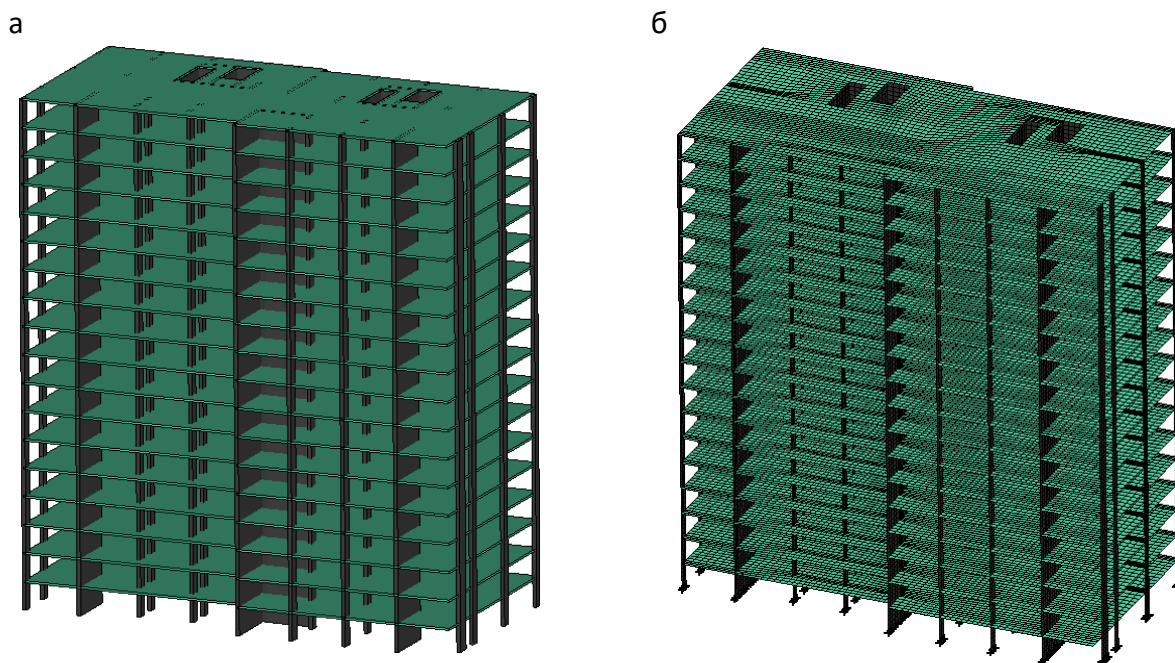


Рис. 5. Конструктивна система будівлі (а) і її розрахункова модель (б)

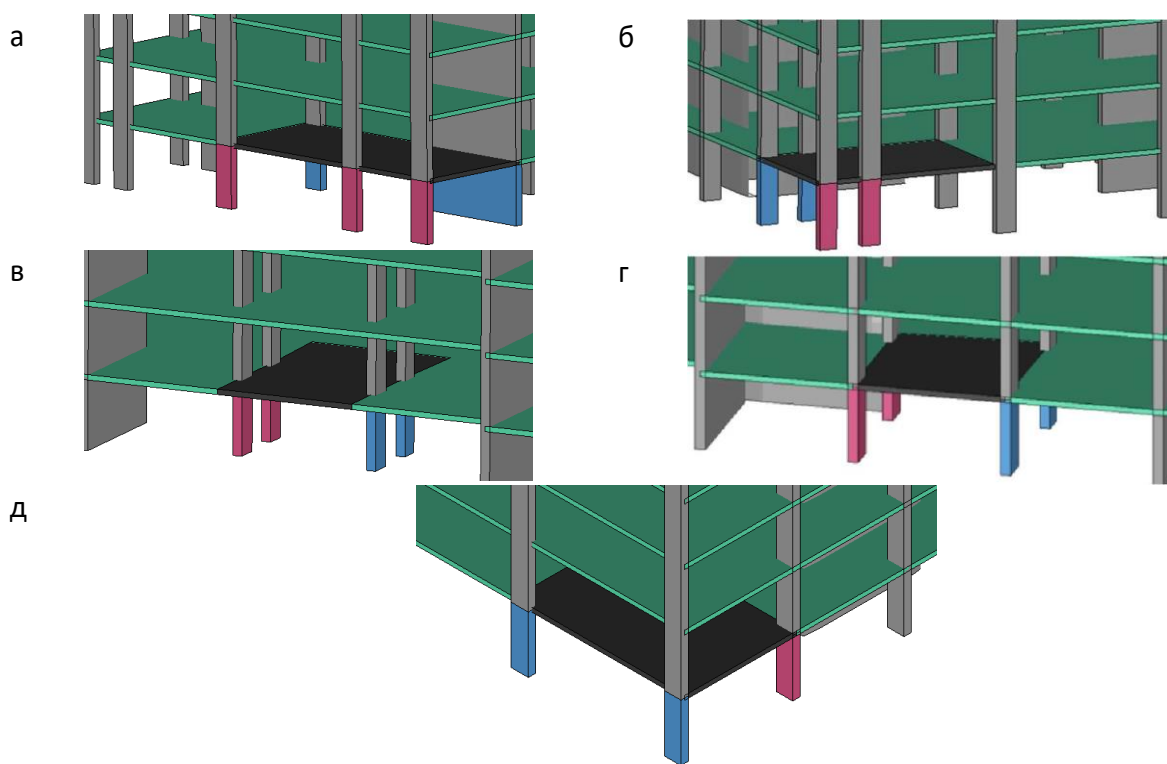


Рис. 6. Елементи у приміщеннях із пожежею зі зниженими механічними характеристиками моменту часу 150 хв впливу стандартного температурного режиму пожежі згідно зі сценаріями пожежі (рис. 4): а – перший випадок; б – другий випадок; в – третій випадок; г – четвертий випадок; д – п'ятий випадок

Для встановлення характеристик матеріалів елементів конструктивної системи було встановлено характеристики матеріалів сталі та бетону в нормальному стані. Бетон конструкцій прийнято класу С25/30, арматура А500С.

При визначенні знижених характеристик міцності внутрішніх шарів елементів залізобетонних конструкцій у приміщенні з пожежею в момент часу 150 хв теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі були використані результати розв'язання теплової задачі. Усі елементи вбудовані у стіни з газобетонних блоків, тож усі вони відчувають односторонній тепловий вплив з боку пожежного середовища з підвищеною температурою. Схема теплового впливу наведена на рис. 7.

Математична модель процесу теплопередачі в елементі залізобетонної конструкції відома з роботи [6]. Ця математична модель заснована на застосуванні нестационарного диференціального рівняння теплопровідності:

$$c(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} \right), \quad (3)$$

де $c(\theta) = \rho(\theta) c_p(\theta)$ – питома об'ємна теплоємність бетону.

Для розрахунку також необхідно задати початкову температуру розрахункової області та параметри граничних умов. Параметри граничних умов наведені в табл. 1.

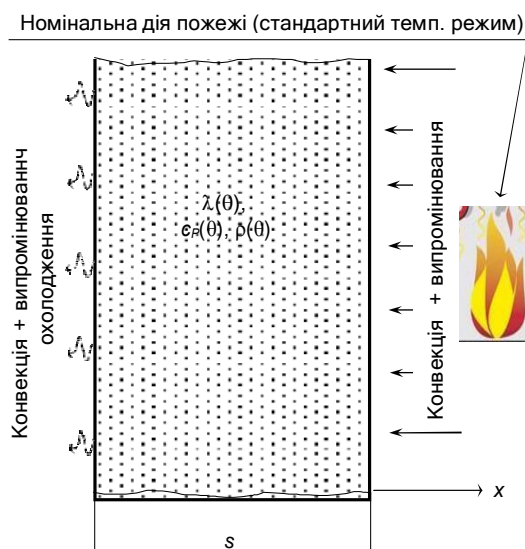


Рис. 7. Узагальнена розрахункова схема при односторонньому нагріванні елементів, які зазнають теплового впливу пожежі

Таблиця 1

Параметри граничних умов для елементів залізобетонного каркаса

Параметр	Позн.	Од. вим.	Вел.	Посилання
Обігрівна сторона				
Конвективна складова коефіцієнта теплообміну	α_c	Вт/(м ² °С)	25	ДСТУ-Н Б EN 1991-1-2:2012
Ступінь чорноти	ε		0,7	ДСТУ-Н Б EN 1992-1-2:2012
Необігрівна сторона				
Коефіцієнт теплообміну	α	Вт/(м ² °С)	9	ДСТУ-Н Б EN 1991-1-2:2012

Для розв'язання задачі теплопровідності за методом кінцевих різниць необхідно задати початковими даними. Згідно з розробленою методикою були встановлені такі початкові дані:

- початкова температура $\theta_0 = 20\text{ }^\circ\text{C}$;
- просторовий крок інтегрування $\Delta h \sim 0.025\text{ м}$;
- часовий крок інтегрування – $\Delta t = 60\text{ с}$.

У результаті розрахунку були отримані температурні розподіли, подані на рис. 8.

Слід зазначити, що на необігрівній стороні цих елементів температура не

перевищує $140\text{ }^\circ\text{C}$. Це означає, що за теплоізолювальною здатністю граничний стан втрати вогнестійкості не настає. Так само визначений клас вогнестійкості, за табл. N.B.1.1 ДСТУ-Н Б EN 1996-1-2:2012, для газобетонних стін товщиною 250 мм (без штукатурки) становить EI 150, що також вказує на відсутність втрати вогнестійкості огороження приміщення. Тож можна зробити висновок, що пожежа не поширюється за межі приміщень, і зниження характеристик міцності можна враховувати тільки для елементів, що знаходяться в межах огороження приміщення.

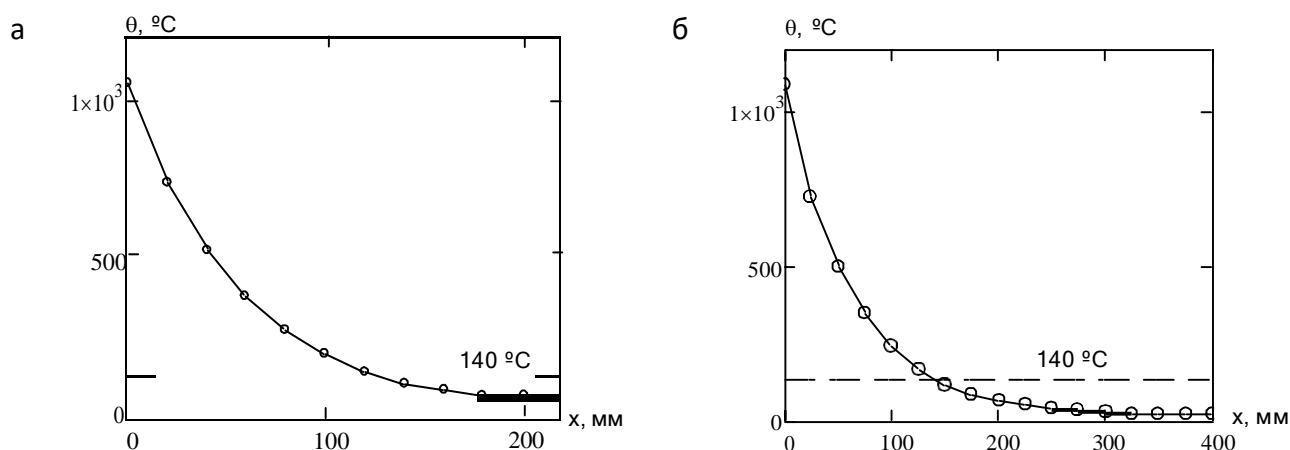


Рис. 8. Температурні розподіли по перерізу залізобетонної плити перекриття (а) і колони, вмонтованої в цегляну стіну (б) на 150 хв розвитку «стандартної» пожежі

При визначенні знижених характеристик міцності внутрішніх шарів елементів залізобетонних конструкцій використовуються усереднені характеристики шарів композитних планарних елементів, показаних на рис. 9. Для кожного з шарів, враховуючи середнє значення температури, були встановлені відповідні знижені фізико-механічні характеристики, наведені в табл. 2-3.

Прикладені тимчасові корисні навантаження множились на коефіцієнт

зниження навантаження при пожежі $\eta_{fi} = 0.7$ [3]. Рівномірно розподілене корисне навантаження на плиту перекриття з урахуванням тимчасових перегородок склало 6.3 кН/м^2 . Знижене навантаження, що прикладається в моделі, становить 4.41 кН/м^2 . Таке навантаження прикладається від нуля до заданого значення рівномірно протягом 3 хв, перед цим протягом 1 хв прикладається власна вага конструктивної системи.

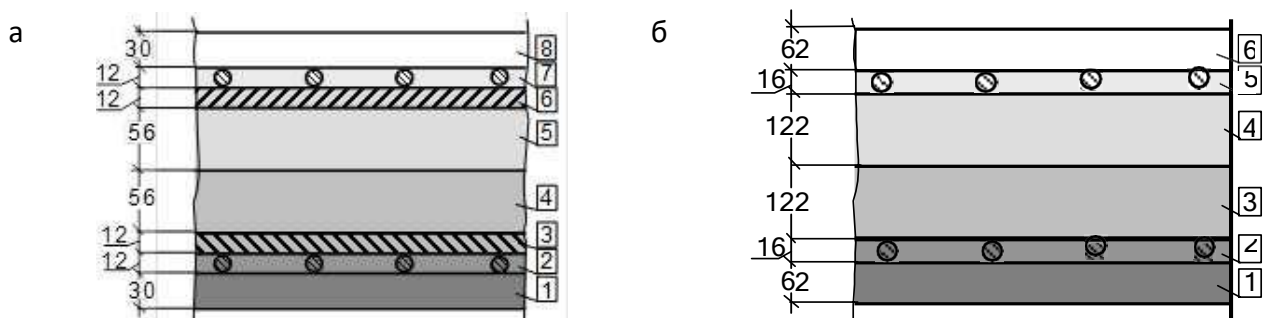


Рис. 9. Розташування композитних шарів у планарних елементах для моделювання каркаса будівлі: а – перекриття; б – колонна

Таблиця 2

Механічні характеристики шарів композитного планарного елемента для моделювання перекриттів

Номер шару	Модуль пружності бетону, ГПа	Межа міцності бетону $f_{ck,t,0}$, МПа	Гранична деформація $\epsilon_{c1,0}$	Межа міцності арматури $f_{sy,0}$, МПа	Процент армування
1	0.14	2.345	0.025	-	0
2	0.636	9.681	0.023	110.4	0.047
3	1.4	12.7	0.014	187.4	0.047
4	3.53	16.9	0.0072	-	0
5	6.609	19.7	0.0045	-	0
6	8.376	20	0.0036	500	0.047
7	8.677	20	0.0034	500	0.047
8	10.84	20	0.0027	-	0

Таблиця 3

Механічні характеристики шарів композитного планарного елемента для моделювання колон і діафрагм

Номер шару	Модуль пружності бетону, ГПа	Межа міцності бетону $f_{ck,t,0}$, МПа	Гранична деформація $\epsilon_{cu1,0}$	Межа міцності арматури $f_{sy,0}$, МПа	Процент армування
1	0.329	5.5	0.025	-	0
2	3.02	16.3	0.0081	232	0.0088
3	4.8	18.6	0.0051	-	0
4	10.4	20	0.0029	-	0
5	11.7	20	0.00255	500	0.0088
6	11.8	20	0.0025	-	0

Результати розрахунків при дії власної ваги та корисного навантаження при нормальних умовах наведені у вигляді полів вертикальних переміщень на рис. 10. Цей розподіл показує відсутність асиметричних значень переміщень вузлів сітки СЕ в осередках виникнення пожежі, а їхні абсолютні значення відрізняються від переміщень частин будівлі поза осередками не більш ніж на 5 %. Також розрахункова схема не набула геометричної змінюваності. Можна констатувати відсутність прогресуючого обвалення.

Для дослідження умов і характеру обвалення будівлі від дії тільки статичних

навантажень був виконаний відповідний розрахунок зі значно підвищеними значеннями навантажень тільки в лівій частині будівлі. На рис. 11 показана деформована схема з ознаками прогресуючого обвалення будівлі. На цій схемі видно, що найбільш вразливою ділянкою будівлі до прогресуючого обвалення є ліва частина будівлі. Вигляд ізополів переміщень асиметричний і відрізняється на декілька порядків від переміщень зі звичайним навантаженням. Так, максимальні переміщення для такого випадку склали 4636 мм (порівняно з 22 мм при нормальних умовах).

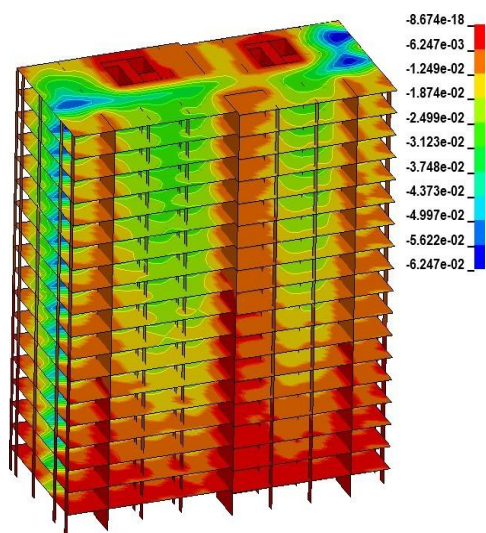


Рис. 10. Розподіл вертикальних переміщень (м) при нормальних умовах

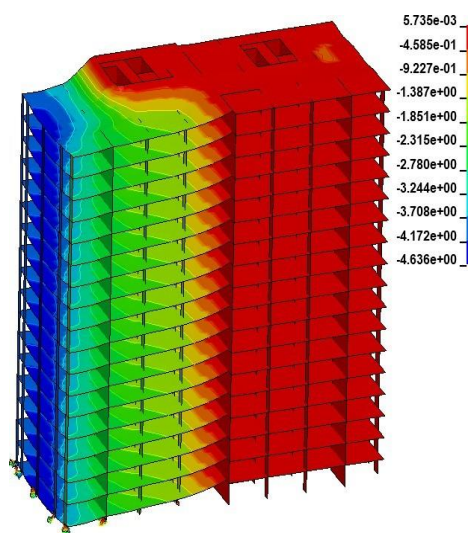
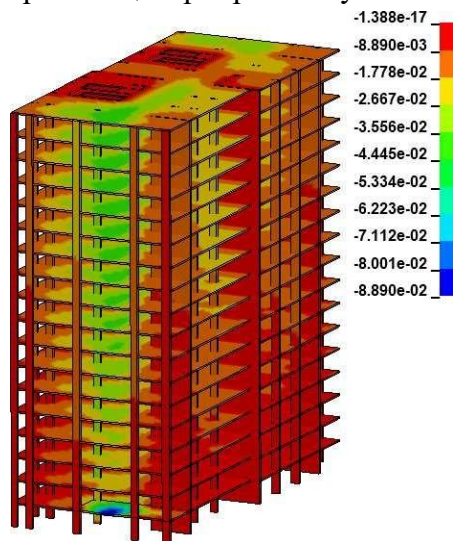


Рис. 11. Розподіл вертикальних переміщень (м) при настанні прогресуючого обвалення будівлі при дії підвищених статичних навантажень

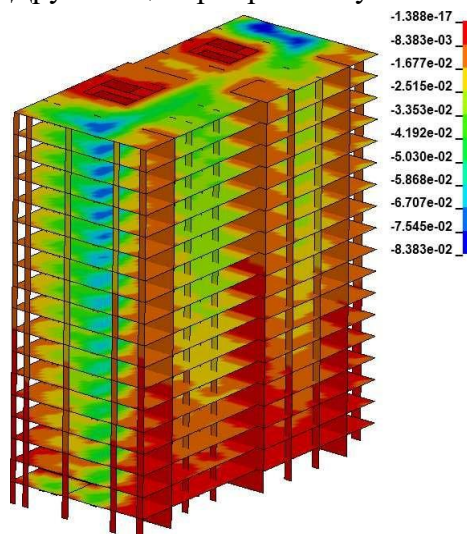
Дослідження можливості настання прогресуючого обвалення будівлі з елементами зі зниженими механічними характеристиками внаслідок теплової дії пожежі в приміщеннях згідно зі встановленими сценаріями пожежі показало, що у всіх випадках прогресуюче обвалення також не відбувається. Вертикальні переміщення будівлі для випадків, коли пожежа розвивається згідно зі встановленими сценаріями пожежі протягом 150 хв, наведені на рис. 12.

Незважаючи на досить значні переміщення в розглянутих варіантах осередків пожежі за звичайних умов – від 60 до 120 мм (для 1-3 і 5 сценаріїв), такі значення переміщень виникають лише на одному поверсі в зоні осередку пожежі і не розповсюджуються по висоті на інші яруси. У сценарії 4 переміщення (25 мм) навіть не досягають граничних за II групою граничних станів. Схема будівлі також не є геометрично змінюваною.

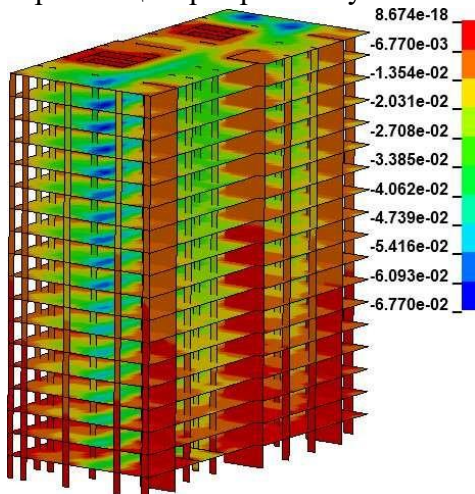
Перший сценарій розвитку пожежі



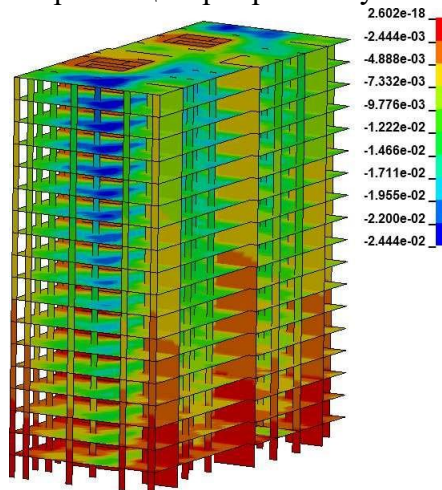
Другий сценарій розвитку пожежі



Третій сценарій розвитку пожежі



Четвертий сценарій розвитку пожежі



П'ятий сценарій розвитку пожежі

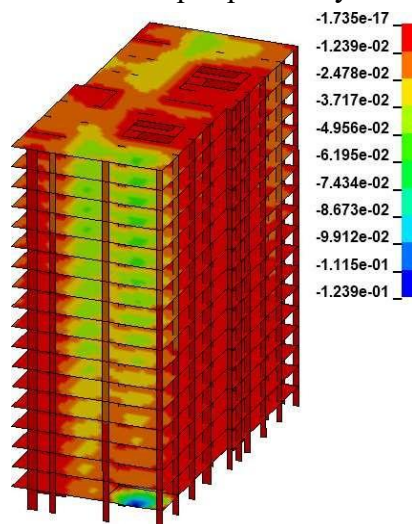


Рис. 12. Розподіл вертикальних переміщень (м) у конструктивній системі при впливі діючих механічних навантажень від різних сценаріїв пожежі

Для вивчення характеру прогресуючого обвалення за умови дії статичного рівномірно розподіленого навантаження, що призводить до обвалення частини колон, був виконаний розрахунок. Визначено, що мінімальне навантаження, при якому з'являються ознаки прогресуючого обвалення, становить 16.4 кН/м^2 . На рис. 13 показані деформаційні схеми конструктивної системи будівлі при ініціації прогресуючого обвалення при різних сценаріях пожежі у приміщеннях будівлі.

Наведені СЕ моделі будівлі при формуванні ознак прогресуючого обвалення для різних сценаріїв розвитку пожежі дають змогу помітити деякі особливості поведінки конструктивної системи в таких умовах. У всіх випадках п'яти сценаріїв пожежі прогресуюче обвалення охоплює частини та елементи конструктивної системи будівлі, що виходять за межі приміщення, а також елементи, фізико-механічні характеристики яких не піддані зниженню внаслідок пожежі. Максимальні значення переміщень склали від 1600 до 3200 мм.

Руйнування елементів відбувається каскадно з найбільш ослаблених, перекидаючись на елементи, що сприймають більше навантаження. Елементи, які не мають знижених механічних характеристик, руйнуються внаслідок збільшення внутрішніх зусиль. Підвищення зусиль у цих елементах обґрунтовується тим, що при зменшенні жорсткості елементів, підданих дії підвищених навантажень, елементи більшої жорсткості сприймають більше навантаження. Так, у сусідніх з нагрітими колонами повздовжнє зусилля виросло на 35 %, а саме обвалення стало можливим лише за умови підвищення корисного навантаження у 3.72 раза. У такому випадку схема стає геометрично змінюваною.

Також важливим висновком, що можна зробити після аналізу механізму прогресуючого обвалення будівлі внаслідок пожежі, є те, що за умов використання рекомендованого настановами [1, 3] впливу пожежі у вигляді стандартної температурної кривої є невідворотним виникнення прогресуючого обвалення. Це зумовлено,

по-перше, відсутністю спадної гілки у стандартному температурному режиму пожежі; по-друге, поширенням пожежі в сусідні приміщення в межах поверху та на суміжні поверхи через перекриття і, як наслідок, необхідністю враховувати зниження фізико-механічних характеристик матеріалів конструкцій у результаті теплового впливу в цих приміщеннях.

Висновки. З огляду на проведені дослідження можна зробити такі висновки:

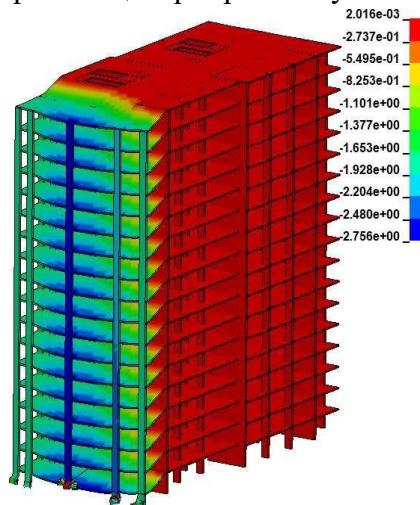
- запропоновано метод та обґрунтовано методику моделювання прогресуючого обвалення каркасних монолітних будинків на базі проведення явного динамічного аналізу багатоповерхової каркасної залізобетонної безтигельної будівлі при пожежі за стандартним режимом (150 хв – I ступінь вогнестійкості), який передбачає врахування нелінійних процесів зміни фізико-механічних характеристик і зміни температури. На відміну від попередніх результатів [11], де розглянуто обговорювану будівлю з ідентичним розташуванням осередків пожежі, у роботі врахована зміна характеристик у часі та нелінійні характеристики матеріалів, а перерізи несучих конструкцій змодельовані шарами, яким можна призначати окремі значення характеристик відповідно до розподілення температур за товщиною перерізу. Усе це дає змогу отримати більш коректні значення компонентів НДС конструкцій, що розглядаються;

- за результатами розрахунку як ознаку настання прогресуючого обвалення прийнято швидке збільшення переміщень, що розповсюджуються як у плані, так і за висотою будівлі, причому ці переміщення переважають на декілька порядків переміщення, отримані на звичайних (неаварійних) умовах. Але слід зазначити, що поява ознак прогресуючого обвалення стала можливою лише при підвищенні корисного навантаження у 3.72 раза. Разом з цим можна спостерігати перерозподіл зусиль у зв'язку зі зміною жорсткостей системи. Так, у сусідніх колонах, що не були піддані дії підвищених температур, повздовжні зусилля зросли на 35 %.

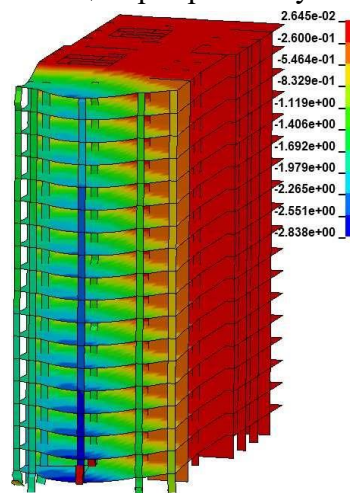
У подальшому інтерес має співставлення цього методу з енергетичним

підходом [12] визначення настання прогресуючого обвалення.

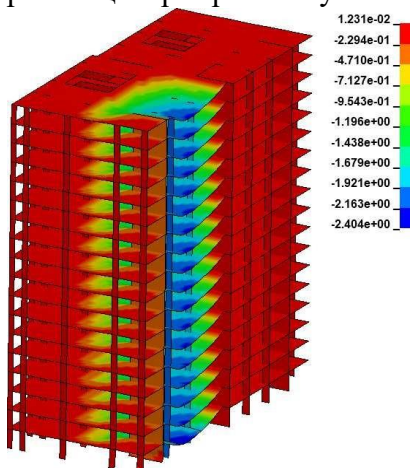
Перший сценарій розвитку пожежі



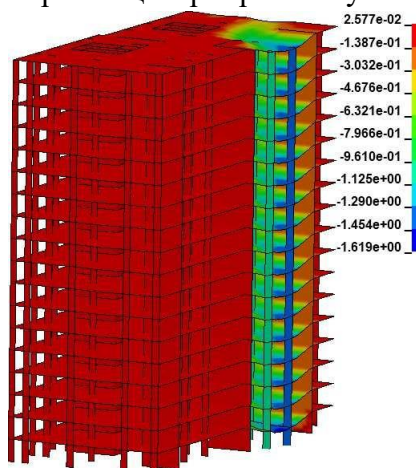
Другий сценарій розвитку пожежі



Третій сценарій розвитку пожежі



Четвертий сценарій розвитку пожежі



П'ятий сценарій розвитку пожежі

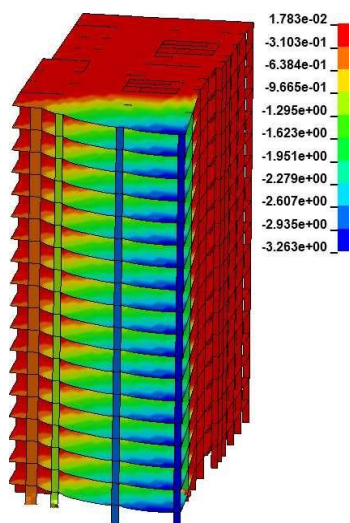


Рис. 13. Розподіл вертикальних переміщень (м) у конструктивній системі при настанні прогресуючого обвалення при розглянутих сценаріях пожежі

Список використаних джерел

1. ДБН В.1.1.7-2016. Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги. Чинний від 01.03.2017. URL: <https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/1-1-0-88> (дата звернення: 25.09.2023).
2. ДСТУ-Н EN 1991-1-2:2010. Єврокод 1. Дії на конструкції. Частина 1-2. Загальні дії. Дії на конструкції під час пожежі (EN 1991-1-2:2002, IDT). Чинний від 01.07.2013. URL: <https://uscc.ua/ru/dstu-n-en-1991-1-22010-en-1991-1-22002-idt-evrokod-1-dii-na-konstrukcii-castina-1-2-zagalni-dii-dii-na-konstrukcii-pid-cas-pozezi> (дата звернення: 25.09.2023).
3. ДСТУ-Н Б EN 1992-1-2:2012. Єврокод 2. Проектування залізобетонних конструкцій. Частина 1-2. Загальні положення. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість (EN 1992-1-2:2004, IDT). Чинний від 01.07.2013. URL: https://dnaop.com/html/62872/doc-%D0%94%D0%A1%D0%A2%D0%A3-%D0%9D_%D0%91_EN_1992-1-2_2012 (дата звернення: 25.09.2023).
4. Jian Jiang, Guo-Qiang Li. Progressive collapse analysis of 3D steel frames with concrete slabs exposed to localized fire. *Engineering Structures*. Vol. 149. 2017. P. 21-34. ISSN 0141-0296. URL: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.07.041>.
5. Kirby B. R. British steel technical European fire test program design, construction and results. In: Fire, static and dynamic tests of building structures. London, 1997.
6. Yun Zhou, Taiping Chen, Yilin Pei, Hyeon-Jong Hwang, Xiang Hu, Weijian Yi, Lu Deng, Static load test on progressive collapse resistance of fully assembled precast concrete frame structure. *Engineering Structures*. Vol. 200. 2019. 109719. ISSN 0141-0296. URL: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109719> (last access: 25.09.2029).
7. Narayanaswamy P., Srinivasan S. K. & Murugan P. Developments and research on fire-induced progressive collapse behaviour of reinforced concrete elements and frame — a review. *Environ Sci Pollut Res* 30, 72101–72113 (2023). URL: <https://doi.org/10.1007/s11356-022-22336-x> (last access: 25.09.2029).
8. ДБН В.1.2-2:2006. Навантаження і впливи. Норми проектування. Чинний від 01.01.2007. URL: <https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/1-1-0-753> (дата звернення: 25.09.2023).
9. Поздеев С. В. Развитие научных основ определения пределов огнестойкости несущих железобетонных конструкций: дисс д-ра техн. наук : 21.06.02. Черкассы, 2012. 360 с.
10. Jian Jiang, Joseph A. Main, Jonathan M. Weigand, and Fahim Sadek. Reduced-Order Modeling of Composite Floor Slabs in Fire. II: Thermal-Structural Analysis. *Journal of Structural Engineering*. 146(6):0402008.
11. Шмуклер В. С., Резнік П. А., Альмохамад М. Про одну можливість оцінювання прогресуючого обвалення конструкцій при пожежі. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. Харків: УкрДУЗТ, 2020. Вип. 194. С. 37-48. URL: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.191.2020.217291> (дата звернення: 25.09.2023).
12. Шмуклер В. С. Про один підхід формування технології проектування раціональних конструкцій. *Вісник ХНАДУ*. 2022. № 98. С. 98-113. URL: <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2022.98.0.93> (дата звернення: 25.09.2023).

Мохамад Альмохамад, аспірант кафедри будівельних конструкцій, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова. ORCID iD: 0000-0002-3715-7437. E-mail: engipr@gmail.com.

Mohamad Almohamad, postgraduate student, Building Structures department, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. ORCID iD: 0000-0002-3715-7437. E-mail: engipr@gmail.com.

Статтю прийнято 28.09.2023 р.