

УДК 69.07

Дауров М.К.,

mk19daurov@gmail.com, ORCID/ 0000-0002-6338-4326,

к.т.н., доцент Білик А.С., artem.bilyk@gmail.com,

ORCID/ 0000- 0002-9219-920X,

Київський національний університет будівництва і архітектури

## ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЖИВУЧОСТІ СТАЛЕВИХ КАРКАСІВ ВИСОТНИХ БУДІВЕЛЬ ПРИ ДІЇ ПОЖЕЖІ

*Висотні будівлі чутливі до прогресуючого руйнування – поширення локального руйнування, що призводить до руйнування всієї будівлі або непропорційно великої її частини. Чинні вітчизняні норми вимагають забезпечення живучості для висотних будівель при дії невстановлених факторів і, віднедавна, - при дії пожежі, що розглядається в даній статті.*

*Ключові слова: висотні будівлі, прогресуюче руйнування, загроза, живучість, колона, пожежа.*

**Актуальність.** Проблема безпеки сьогодні досить актуальна в різноманітних сферах людської життєдіяльності. В тому числі і в сфері експлуатації будівельних конструкцій, будівель і споруд. Розвиток суспільства з другої половини ХХ століття призвів до створення технічних і організаційно-технічних систем глобального масштабу, які забезпечують активність в політичній, економічній, військовій, екологічній і інших областях.

По мірі розвитку подібних систем зростає і їх чутливість до зовнішніх дій як стихійного характеру – землетруси, паводки, сонячна активність, погодні катаклізми, техногенні катастрофи, так і цілеспрямованого характеру – бойові дії, тероризм і т.п.

Останнім часом актуальними стали питання стійкості висотних будівель (висотою від 73,5 м) [1] до так званого прогресуючого руйнування – поширення локального руйнування, що призводить до руйнування всієї будівлі або непропорційно великої її частини.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У вітчизняних нормах [1], [2] відсутні формалізовані методики розрахунку будівель на живучість, є лише рекомендації. В [1] рекомендується вести розрахунок на живучість з моделюванням локального руйнування шляхом вилучення з розрахункової схеми однієї з колон першого поверху. Проте при моделюванні локального руйнування в даний спосіб не враховується фактор, що спричиняє вилучення колони з роботи і параметри вилучення.

В [2] наведено перелік подій, які слід врахувати при розрахунку на живучість. Методик для розрахунку на живучість при конкретній загрозі у вітчизняних нормах не наведено. В американських нормативних документах таких як UFC 4-023-03 [10] викладені основні положення щодо розрахунку на прогресуюче руйнування і методи захисту від нього, а також особливості і приклади окремо по металевим, залізобетонним, кам'яним, дерев'яним, холодногнутих сталевим конструкціям. В європейських нормах [3] наведені методики розрахунку на живучість при ударі та внутрішньому вибуху. В розглянутих при огляді вибраних нормативних документів методик чи рекомендацій щодо розрахунку на живучість при пожежі не виявлено.

В дослідженнях [4] доведено, що при пожежі більшого впливу зазнають балки, ніж колони і раніше виходять з роботи розрахункової схеми. З цього випливає, що вилученням колони першого поверху неможливо змодельовати локальне руйнування внаслідок пожежі.

**Нерозв'язана раніше частина проблеми.** Якщо вплив удару автотранспорту або вибуху можна змодельовати вилученням колони першого поверху, то питання моделювання впливу пожежі є відкритим для вивчення.

**Задачі дослідження.** В даному дослідженні поставлено задачу моделювання впливу пожежі як конкретної загрози та визначення можливості запроектувати сталевий каркас висотної будівлі, щоб не допускати при розрахунку локального руйнування елементів конструктивної схеми.

**Виклад основного матеріалу.** У якості вихідної моделі прийнято сталевий рамний каркас багатоповерхової будівлі заввишки 75,6м (18 поверхів) та розмірами в плані 45х45м із центральним ядром жорсткості з розмірами в плані 15х15м, крок колон 7,5м у обох напрямках. Каркас будівлі запроектовано згідно діючих будівельних норм та нормативних навантажень. Сталь несучих конструкцій прийнято С345.

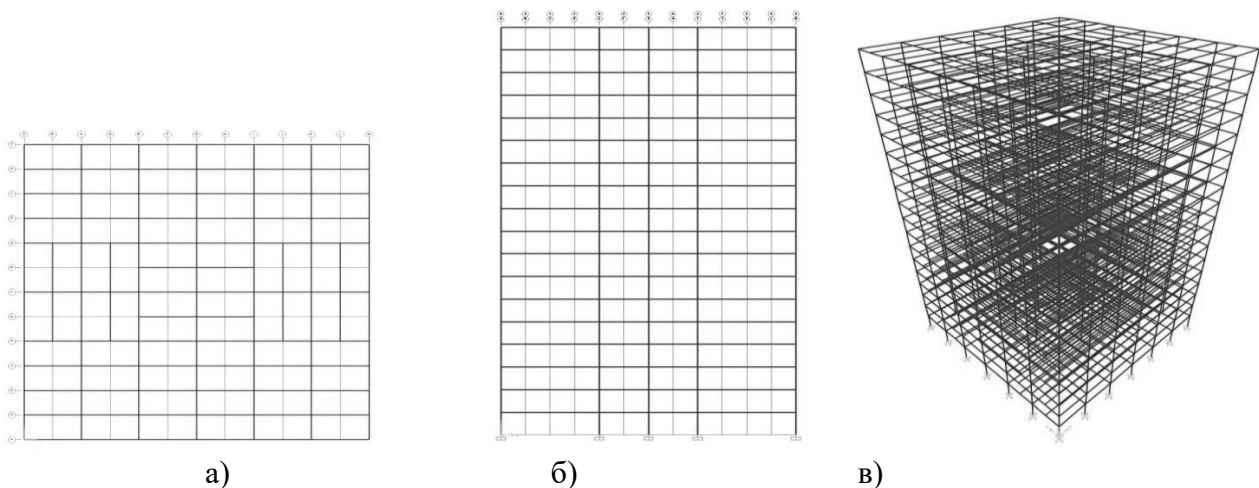


Рис.1. Загальний вигляд розрахункової моделі: а) план будівлі; б) поперечний розріз; в) просторовий вигляд

Було розглянуто шість експертно найбільш імовірних та найгірших сценаріїв виникнення та поширення пожежі в будівлі на першому поверсі в плані (рис. 2).

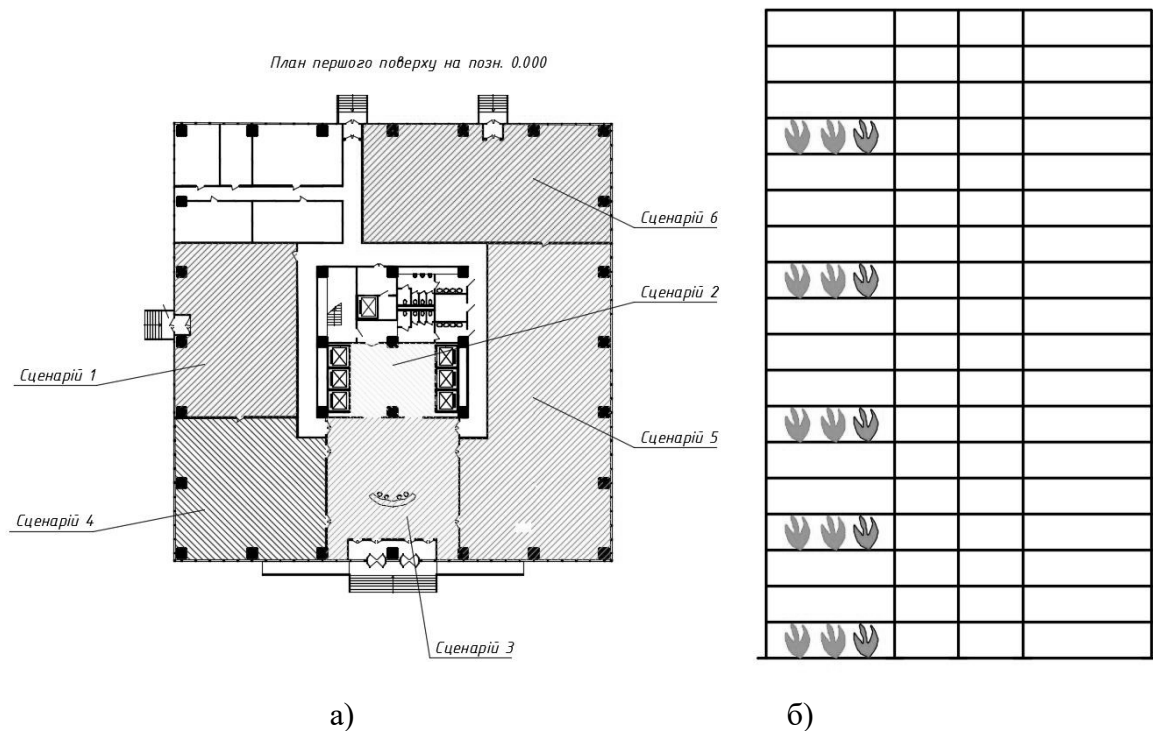


Рис. 2. Сценарії виникнення та поширення пожежі:  
а) – в межах поверху, б) - по висоті будівлі

Було введено спрощення, що планування приміщень на всіх поверхах ідентичне. Сценарії пожежі було експертно розглянуто на 1-му, 4-му, 7-му, 11-му, 15-му поверхах (на кожному поверсі по 6 сценаріїв).

Для кожного сценарію були визначені параметричні температурно-часові залежності пожежі згідно Єврокоду 1 [5]. Було визначено вогнестійкість незахищених сталевих конструкцій згідно Єврокоду 3 [6]. За критичними температурами було запроєктовано вогнезахист сталевих конструкцій згідно Посібника до ДСТУ [7], забезпечивши межу вогнестійкості R180 [1] (так як ДСТУ-Н EN 1993-1-2:2005 [6] регламентує диференційований підхід - врахування вогнестійкості незахищених сталевих конструкцій при проектуванні вогнезахисту). Обраний вогнезахисний засіб – цементно-вермікулітові плити типу «Ендотерм 210104».

Модельовання впливу пожежі на сталеві конструкції каркасу було виконане за допомогою температурних навантажень, значення яких були рівними температурам сталі захищених сталевих конструкцій, що були визначені згідно Єврокоду 3 [6] для кожного сценарію. Після визначення значень температурних навантажень для кожного сценарію пожежі було виявлено, що міцнісні характеристики сталі в конструктивних елементах, що

піддаються дії пожежі, майже не змінюються (при максимальному температурному навантаженні 115,2 °С значення границі пропорційності знижується на 2,9% та значення модуля пружності на 1,5%) при забезпеченні вогнезахисними матеріалами межі вогнестійкості R180.

Навантаження у аварійній ситуації приймаються постійні та довготривалі зі значенням коефіцієнтів надійності за навантаженням, що дорівнюють одиниці [1], та коефіцієнтом надійності за відповідальністю  $\gamma_n=1,05$ , що відповідає класу наслідків ССЗ у аварійній розрахунковій ситуації при перевірці елементів за першою групою граничних станів [2]. Коефіцієнти надійності за матеріалом також прийняті рівними одиниці відповідно до [1]. Коефіцієнти сполучення навантажень прийняті як для аварійної ситуації [8]. Аварійним навантаженням в даному випадку є температурне навантаження.

Після проведення розрахунку на дію пожежі було виявлено, що за жодного сценарію міцність всіх конструктивних елементів каркасу не є забезпечена. Було прийнято рішення перевірити можливість запроектувати каркас таким чином, щоб не допускати локальне руйнування при розрахунку, а разі відсутності такої можливості – проаналізувати характер локального руйнування та допустити його в розрахунку.

Першою стратегією забезпечення живучості було обрано збільшення площі перерізів в каркасі. Підбір переріз було здійснено в ПК ЛИРА. Розрахунок сталевих конструкцій виконано згідно ДБН В.2.6-198:2014 [9].

За результатами розрахунку маса сталі балок збільшилася на 60,9% після збільшення перерізів, що пояснюється виникненням в балках поздовжніх зусиль, значення яких досягають -2967 кН. Маса сталі колон збільшилася на 20,8 %, що пояснюється появою додаткових згинальних моментів в колонах від температурного розширення балок, що до них примикають. Значення згинальних моментів в колонах досягають 4282 кНм. Всього маса сталі каркасу збільшилася на 42,4 %.

Під час аналізу габаритів збільшених перерізів було виявлено, що розмір найбільшого перерізу колони (квадратний коробчастий переріз із чотирьох листів 1000x 32 мм) не змінився. Висота найбільшого перерізу балки (складений двотавр) в результаті розрахунку із урахуванням дії пожежі склала 850 мм (полиці 420 x 20 мм, стінка 850 x 20 мм) , що є більшим, ніж висота найбільшого перерізу балки без урахування дії пожежі (складений двотавр полиці 400 x 20 мм, стінка 800 x 16 мм) – 800 мм.

Із порівняння габаритів збільшених перерізів та перерізів каркасу без урахування дії пожежі помічено, що габарити збільшених перерізів є прийнятними для даної будівлі навіть без урахування не лінійності роботи.

З метою зменшення металоємності каркасу було розглянуто ще дві стратегії.

Другою стратегією забезпечення живучості було забезпечення сумісної роботи сталевих балок із залізобетонною плитою перекриття. Маса сталі колон не збільшилася. Але маса сталі балок збільшилася на 125%, що пояснюється виникненням в балках значних поздовжніх зусиль, значення яких досягають - 8322 кН, що набагато більше, ніж без спільної роботи балок із плитою. Всього маса сталі каркасу збільшилася на 67,3%, що більше, ніж при збільшенні перерізів.

Третьою стратегією було збільшення товщини вогнезахисного матеріалу в балках на 3 мм із метою зменшення металоємності каркасу у порівнянні з варіантом зі збільшенням площі перерізів. Маса сталі балок при цьому збільшилася на 53,6%, що на 7,3% менше, ніж при стратегії зі збільшенням перерізів. Маса сталі колон збільшилася на 20,4 %, що на 0,4% менше, ніж при стратегії зі збільшенням перерізів. Всього масу сталі каркасу було збільшено на 38,3 %, що на 4,1% менше, ніж при стратегії зі збільшенням перерізів, та на 29% менше, ніж при стратегії із забезпеченням сумісної роботи сталевих балок із залізобетонною плитою перекриття.

Розглянуті стратегії були порівняні з точки економічних витрат (табл. 1).

Таблиця 1

## Порівняння стратегій забезпечення живучості каркасу при пожежі

	Заходи	Збільшення металоємності, %	Додаткові грошові витрати, млн. грн.*		
			На метал	На вогнезахист	Всього
Стратегія 1	Збільшення перерізів	42,4	33,7	-	33,7
Стратегія 2	Забезпечення сумісної роботи балок та з/б плити	67,3	43,0	-	43,0
Стратегія 3	Збільшення товщини вогнезахисного матеріалу в балках на 3 мм	38,3	30,4	0,98	31,38

\* ціни наведено комерційні середньоринкові експертні для м. Київ

**Висновки.** Найекономічнішою стратегією забезпечення живучості каркасу при пожежі є збільшення товщини вогнезахисного матеріалу в балках. Для цієї стратегії було проведено повторний розрахунок, але з урахуванням

фізичної та геометричної не лінійності. Врахування не лінійності роботи дозволило зекономити 2,1%, а загальне збільшення маси сталі каркасу склало 36,2%.

Вогнезахист, що забезпечує межу вогнестійкості R180 в сталевих конструкціях висотних будівель, мінімізує температурні навантаження та дозволяє розрахувати каркас будівлі із урахуванням дії пожежі. Габарити збільшених перерізів є прийнятними для каркасу вихідної моделі. Було зроблено висновок, що сталевий каркас висотної будівлі можливо запроектувати таким чином, щоб не допускати при розрахунку локального руйнування елементів конструктивної схеми внаслідок дії пожежі.

Найкращою стратегією забезпечення живучості при пожежі в даному дослідженні було визнано збільшення товщини вогнезахисту. Було зроблено висновок, що при розрахунку сталевих каркасів на живучість при пожежі необхідно враховувати не лише конструктивні заходи, а й протипожежні.

### Література:

1. Державні будівельні норми. Будинки і споруди. Проектування висотних житлових і громадських будинків: ДБН В.2.2-24:2009. – [Чинні від 2009-09-01]. – К.: Мінрегіонбуд України, 2009. – 133 с. – (Державні будівельні норми).
2. ДБН В.1.2-14:20XX (проект, друга редакція). Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ. – К.: Мінрегіонбуд України, 2017. – 81 с. – (Державні будівельні норми).
3. EN 1991-1-7. Eurocode 1: Actions on structures - Part 4: Part 1-7: General actions - Accidental actions: EN 1991-1. - Brussels: Management Centre, 2006. - 69 с. - (European Standard).
4. Sun, R., Burgess, I.W., Huang, Z. and Dong, G (2015) Progressive failure modeling and ductility demand of steel beam-to-column connections in fire. *Engineering Structures*, 89. 66-78. ISSN 0141-0296.
5. 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). - [Чинні від 2013-07-01]. – К.: Мінрегіонбуд України, 2011. – 80 с.
6. ДСТУ-Н EN 1993-1-2:2005. ЄВРОКОД 3. ПРОЕКТУВАННЯ СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ. Частина 1-2. Загальні положення. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість (EN 1993-1-2:2005, IDT) - [Чинні від 2013-07-01]. – К.: Мінрегіонбуд України, 2012. – 106 с.
7. РОЗРАХУНОК СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ НА ВОГНЕСТІЙКІСТЬ ВІДПОВІДНО ДО ЄВРОКОДУ 3. Практичний посібник до ДСТУ-Н EN 1993-1-2:2010 / К.В.Калафат // Український центр сталевих будівництва. – 2016. – 83с.
8. ДБН В.1.2-2:2006. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження і впливи. Норми проектування. – Київ : Мінбуд України, 2006. – 77 с. – (Державні будівельні норми України).
9. ДБН В.2.6-198:2014. Конструкції будівель і споруд. Сталеві конструкції. Норми проектування. – Київ : Мінрегіон України, 2014. – 199 с. – (Державні будівельні норми України).
10. UFC 4-023-03. United Facilities Criteria (UFC). «Design of Buildings to Resist Progressive Collapse». Department of Defense USA. 2009.

Дауров М.К., к.т.н., доцент Билык А.С.,  
Киевский национальный университет строительства и архитектуры

## **ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЖИВУЧЕСТИ СТАЛЬНЫХ КАРКАСОВ ВЫСОТНЫХ ЗДАНИЙ ПРИ ДЕЙСТВИИ ПОЖАРА**

Высотные здания чувствительны к прогрессирующему разрушению – распространение локального разрушения, которое приводит к разрушению всего здания или непропорционально большой его части. Отечественные нормы требуют обеспечения живучести для высотных зданий при действии неустановленных факторов и, с 2017 года, - при действии пожара, что рассматривается в данной статье.

Ключевые слова: высотные здания, прогрессирующее разрушение, угроза, живучесть, колонна, пожар.

Daurov M.K.,  
PhD, Associate Professor Bilyk A.S.,  
Kyiv national university of construction and architecture

## **THE ROBUSTNESS OF STEEL CARDS OF HIGH-RISE BUILDINGS UNDER ACTION OF FIRE**

High-rise buildings are sensitive to progressive collapse – when the local destruction leads to the collapse of the entire building or disproportionately large part of it. Current Ukrainian norms are requiring the robustness of high-rise buildings under the action of unidentified factors and, since 2017, - under the action of fire, which is considered in this article.

Key words: high-rise buildings, progressive collapse, threat, robustness, column, fire.