

*Р.С. Яковчук<sup>1</sup>, Я.В. Балло<sup>2</sup>, А.Д. Кузык<sup>1</sup>, О.І. Казітін<sup>1</sup>, В.М. Ковальчук<sup>1</sup>*  
(<sup>1</sup>Львівський державний університет безпеки життєдіяльності,  
<sup>2</sup>Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту)

## FDS МОДЕЛЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОТИПОЖЕЖНИХ КАРНИЗІВ НА ЗАПОБІГАННЯ ПОШИРЕННЮ ПОЖЕЖІ ФАСАДНИМИ КОНСТРУКЦІЯМИ ВИСОТНИХ БУДІВЕЛЬ

**Мета.** Застосовуючи FDS-моделювання виявити вплив конструктивних параметрів фасадних протипожежних карнизів на ефективність запобігання поширенню пожежі вертикальними будівельними конструкціями у висотних будівлях.

**Методика.** Для розрахунку температурних розподілів по фасадних конструкціях моделі висотного будинку використовувалася комп'ютерна система Pyrosim, яка слугує користувацькою оболонкою для програми Fire Dynamics Simulator (FDS). Ця система FDS використовує чисельні алгоритми розв'язку повної системи диференціальних рівнянь Нав'є-Стокса для визначення температури та інших небезпечних факторів під час пожежі.

**Результати.** Наведено результати FDS моделювання під час обґрунтування конструктивних параметрів протипожежних карнизів, які виступають за межі фасаду та розташовуються на межі протипожежних відсіків по контуру висотних будівель з умовною висотою більше 73,5 м. За допомогою FDS моделювання побудовано типову модель висотної будівлі, відтворено пожежне навантаження всередині приміщень та обґрунтовано критерії руйнування зовнішніх світлових прорізів (вікон), як невід'ємного чинника поширенню пожежі зовнішніми вертикальними будівельними конструкціями висотних будівель. Здійснено дослідження ефективності конструктивних параметрів карнизів та їх вплив на ефективність запобігання поширенню пожежі вертикальними будівельними конструкціями за однакових вихідних умов розвитку пожежі. Побудовані порівняльні залежності розподілу температур прогріву фасаду будинку, а також визначено тривалість досягнення їх критичних значень.

**Наукова новизна.** Проведено аналіз отриманих даних в результаті FDS-моделювання за однакових вихідних умов та зроблено висновки, щодо ефективності конструктивних параметрів протипожежних фасадних карнизів на межі протипожежних відсіків та шляхів подальшого удосконалення їх конструкції для запобігання поширенню пожежі у висотних будівлях. Наведені дослідження спрямовані для використання їх проектними установами під час розробки конструктивних параметрів протипожежних карнизів, які виступають за межі фасаду та розташовуються на межі протипожежних відсіків по контуру висотних будинків, а також для удосконалення нормативної бази у галузі пожежної безпеки висотного будівництва.

**Ключові слова:** FDS-моделювання, Pyrosim, поширення пожежі по фасаду, висотні будинки, фасадні протипожежні карнизи, конструктивні параметри карнизів.

*R.S. Yakovchuk, Ya.V. Ballo, A.D. Kuzyk, O.I. Kagitin, V.M. Kovalchuk*

## FDS MODELING OF THE FIRE-PREVENTING EAVES EFFECTIVENESS TO PREVENT THE FIRE SPREADING ON FACADE OF HIGH-RISE BUILDINGS

**Purpose.** Applying FDS modelling to detect the influence of structural parameters of facade fire eaves, the effectiveness of fire prevention by vertical building structures in high-rise buildings.

**Methods.** To calculate the temperature in the high-rise building model used Pyrosim computer system that serves as the user's shell application Fire Dynamics Simulator (FDS). This FDS system uses numerical algorithms to solve the complete Navier-Stokes differential equation system to determine temperature and other hazardous factors during a fire.

**Results.** The results of FDS modelling during substantiation of constructive parameters of fire eaves, which protrude beyond the facade and located on the border of fire compartments along the contour of high-rise buildings with a nominal height of more than 73.5 m, are presented. Premises and substantiated the criteria for the destruction of external light openings (windows) as an integral factor in the spread of fire on the external vertical building structures of high-rise

buildings. A study of the effectiveness of the structural parameters of cornices and their impact on the effectiveness of fire prevention by vertical building structures under the same initial conditions of fire development. Constructed comparative dependences of distribution of temperatures of heating of a facade of the house. Also defined the duration of achievement of their critical values.

**Scientific novelty.** The analysis of the data obtained as a result of FDS modelling under the same initial conditions and conclusions on the effectiveness of design parameters of fire facade cornices on the border of fire compartments and ways to further improve their design to prevent the spread of fire in high-rise buildings. These studies are aimed at their use by design institutions during the development of design parameters of fire eaves, which protrude beyond the facade and are located on the border of fire compartments along the contour of high-rise buildings, as well as to improve the regulatory framework for fire safety.

**Keywords:** FDS modelling, Pyrosim, the spread of fire on the facade, high-rise buildings, facade fire eaves, design parameters of eaves.

**Вступ.** Поширення вогню по фасадам висотних будинків є одним із найнебезпечніших видів розвитку пожежі, що обумовлюється її швидким розвитком, складністю гасіння, достатньою кількістю кисню, а також додатковим вітровим впливом, що спонукають її швидке поширення фасадними конструкціями [1]. За результатом аналізу статистичних даних про пожежі, їх причини та наслідки, що виникли у висотних будівлях упродовж останніх десяти років в Україні виявлено, що кількість пожеж у висотних будівлях та кількість жертв із кожним роком збільшується, що обумовлено сталим щорічним збільшенням самої кількості висотних будівель.

Світова статистика свідчить, що у різних країнах виникає значна кількість пожеж у будівлях, облаштованих системами фасадної теплоізоляції. Наприклад, за даними Державної пожежної служби Польщі впродовж останніх 4-х років в країні зафіксовано 117 випадків пожеж на фасадах будівель, утеплених пінополістиролом. У 67 % таких пожеж виникали труднощі під час евакуації та рятування людей, а зовнішнє облицювання сприяло поширенню вогню з одного поверху на інший, у 13 % випадків вогонь поширився із зовнішніх стін на покрівлю. В США, відповідно до [2], пожежі “зовнішніх стін” будівель та споруд становлять від 1,3 % до 3 % від кількості пожеж у обраних типах об’єктів. Американські фахівці зазначають, що такі пожежі мають низьку частоту виникнення, проте пов’язані з ними наслідки, з точки зору поширення пожежі, травм і загибелі людей, можуть бути значними.

Крім цього, аналіз пожеж та їх наслідків в Україні та за кордоном показує, що більшість пожеж, які виникали у висотних будівлях, супроводжуються поширенням вогню фасадами, що унеможливило їх швидку ліквідацію та значно ускладнювало роботу пожежно-рятувальних підрозділів, а також обумовлювало необхідність залучення спеціальної протипожежної техніки. Поширення пожежі зовнішніми вертикальними будівельними конструкціями висотних будівель також унеможливило ліквідацію пожежі на початковій стадії її виникнення, в тому числі із застосування систем протипожежного захисту, якими обладнуються висотні будівлі.

Аналізуючи приклади найбільш резонансних пожеж, що виникали в будівлях протягом останніх декількох років як в Україні, так і за її межами та супроводжувалися горінням фасадних систем, можна констатувати проблему в забезпеченні пожежної безпеки конструкцій зовнішніх стін будівель та споруд із фасадною теплоізоляцією як на етапі будівництва, так і під час їх експлуатації. До таких пожеж в будівлях та спорудах із фасадною теплоізоляцією призводять не лише грубі порушення правил пожежної безпеки, а й застосування будівельних та оздоблювальних матеріалів із підвищеною пожежною небезпекою [3]. Слід зазначити, що типові пожежі мають низьку частоту виникнення, проте пов’язані з ними наслідки (площа поширення пожежі, матеріальні збитки, травми та загибель людей) можуть бути значними.

Таким чином, постає завдання дослідити можливі конструктивні заходи, які б запобігали поширенню пожежі вертикальними будівельними конструкціями висотних будівель.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В роботах [4, 5] наведено аналіз причин і наслідків пожеж у висотних будівлях, а також досліджено вплив конструктивних параметрів фасадних протипожежних карнизів на межі протипожежних відсіків на запобігання поширенню пожежі у висотних будинках за допомогою застосування FDS-моделювання. Результати показали, що наявність протипожежного карниза, який відповідає вимогам [6, 7] знижує фактичну температуру на рівні верхнього поверху під яким виникла пожежа фактично на 45-47%. Разом із тим, під час проведення досліджень, було виявлено збільшення площі температурного розподілу прогріву конструкції поверхні фасаду на 30-35 %, що є безперечно негативним явищем, та може бути пояснене прямим контактом полум’я пожежі з перешкодою необтічної форми.

В роботах [8, 9] представлені результати досліджень впливу ефекту балкона на поширення полум’я через зовнішні вікна на вище розташовані поверхи. Під час вогневих випробувань було досліджено три конфігурації над віконним прорізком, з якого поширювався вогонь: без балкона, з балконом

однакової ширини з віконним прорізом та з балконом на 1 м ширшим з кожного боку віконного прорізу. Натурні вогневі випробування були чисельно змодельовані за допомогою Fire Dynamics Simulator (FDS). Результати експериментальних та чисельних методів дослідження порівнювали між собою. Були зроблені висновки та запропоноване найбільш ефективне конструктивне рішення щодо обмеження поширення вогню поверхнею фасадних систем.

В роботі [10] виконаний чисельний аналіз для оцінки впливу пожежних перешкод на поширення вогню через вентилязовані фасади. Наявність вертикальних перешкод позитивно вплинула на запобігання поширенню вогню, оскільки ізоляція за вертикальною перешкодою залишалася неушкодженою. Вертикальні перешкоди затримували горизонтальне поширення вогню залежно від типу ізоляції. Отримані результати випробувань стали основою для майбутніх досліджень впливу пожежних перешкод на поширення вогню поверхнею фасадних систем.

Вплив пасивних заходів для запобігання зовнішньому вертикальному поширенню вогню досліджували за допомогою інструменту Fire Dynamics Simulator (FDS) в [11]. Чисельне дослідження було поділено на валідаційне дослідження та порівняльний аналіз. Результати, отримані авторами, показують, що облаштування фасадних конструкцій горизонтальним протипожежним карнизом шириною 60 см забезпечує кращий захист від пожежі порівняно з конструкцією без карниза.

Метою роботи [12] було дослідити та порівняти ефект горизонтальних карнизів між захищеними віконними отворами на фасаді будівлі. Було показано, що версія FDS 6.2.0 добре підходить як інструмент розрахунку для цієї проблеми, враховуючи представлені параметри. Основними висновками було те, що використання горизонтальних карнизів шириною щонайменше 60 см призводить до менших наслідків та нижчих рівнів ризику на фасаді під час пожежі. Моделювання горизонтальних карнизів шириною 20 см і 30 см не дало задовільних результатів. Використання горизонтальних карнизів шириною 60, 80 та 100 см призвело до зменшення температури поверхні на фасаді на 1,2 м над віконним отвором на 15-50 %.

Проведений аналіз зарубіжних будівельних норм або наукових досліджень ефективності протипожежних карнизів показав, що на сьогодні відсутні рекомендації або єдиний підхід щодо конструктивних параметрів протипожежних карнизів, які передбачаються на фасаді висотної будівлі, окрім того що згідно з [13] значення довжини захисної конструкції не повинно становити менше 1,2 м.

Разом із цим, враховуючи [6, 7], постає питання дослідження не лише найбільш ефективного значення довжини карниза, а і його форми, як не-

від'ємної складової впливу на запобігання поширенню пожежі та зменшення площі температурного розподілу прогріву конструкції поверхні фасаду.

**Мета та задачі дослідження.** Метою цієї роботи є на основі FDS-моделювання, виявити вплив конструктивних параметрів фасадних протипожежних карнизів на ефективність запобігання поширенню пожежі вертикальними будівельними конструкціями у висотних будівлях.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися такі задачі:

- на основі аналізу відомих конструктивних рішень протипожежних фасадних карнизів у висотних будівлях, розробити типову модель фасаду та фасадних протипожежних карнизів різної форми за допомогою програмного комплексу FDS;
- визначити вплив ефективності конструктивних параметрів протипожежних фасадних карнизів та шляхів подальшого удосконалення їх конструкції на запобігання поширенню пожежі у висотних будівлях за однакових вихідних умов експерименту.

**Методи дослідження.** Для розрахунку температури на поверхні фасадних систем ми застосували комп'ютерну систему Pyrosim, яка слугує користувацькою оболонкою для програми Fire Dynamics Simulator (FDS). Система FDS використовує чисельні алгоритми розв'язку повної системи диференціальних рівнянь Нав'є-Стокса для визначення температури та інших небезпечних факторів під час пожежі. Розробником та реалізатором цих алгоритмів у комп'ютерній системі FDS для проведення розрахунків та візуалізації їх результатів є Національний інститут стандартів і технологій (National Institute of Standards and Technology – NIST). Крім цього, розробник виконав верифікацію та валідацію результатів розрахунків у дуже широкому діапазоні випадків пожеж.

Для візуалізації результатів розрахунків використовується програмний модуль системи PyroSim Smokeview, що дозволяє побудувати відповідні графічні відображення розподілів температури. При цьому, дана система також дає змогу відслідковувати динаміку температурних полів та відтворювати процес нагрівання за допомогою анімації. Також система дозволяє отримувати картини задимлення, розподілення концентрації продуктів горіння тощо. Алгоритми FDS засновані на чисельному розв'язку диференціальних рівнянь Нав'є-Стокса з огляду на припущення, що теплові потоки під час пожежі мають низьку швидкість та залежні від температури, із відповідними закономірностями утворення.

Для моделювання та дослідження поширення температури фасадом висотного будинку при різних типах протипожежних карнизів було створено модель 23-поверхового будинку. В основі матеріалу

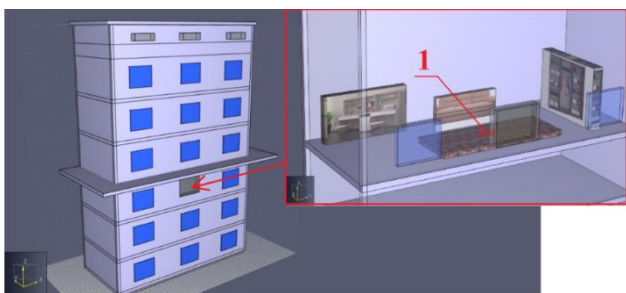
конструкції будинку було обрано монолітний бетон типу «бетон важкий» густиною  $2280 \text{ кг/м}^3$ , питома теплоємність  $2,04 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$  та теплопровідністю  $1,35 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ .

Віконні прорізи будинку закриті склом, густиною  $2500 \text{ кг/м}^3$ , з питомою теплоємністю  $0,67 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$  та теплопровідністю  $0,061 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ . Характеристики облицзовального матеріалу фасаду моделі висотного будинку не враховувалися, умовно приймаючи, що відповідно до вимог будівельних норм вони мають бути негорючими.

Крок розрахункової сітки FDS-моделі становив  $25 \text{ см}^2$ , що обумовлено геометричними розмірами моделі будівлі та кратності розміру комірки сітки відносно геометричних параметрів самого карнизу. За сценарієм змодельованої пожежі вона виникає на поверсі, що розташований безпосередньо під протипожежним фасадним карнизом, при цьому у приміщенні відкрите одне вікно, а утворюваний тепловий потік та полум'я вільно поширюються із вікон квартири.

**Результати дослідження ефективності протипожежних карнизів.** Прийнято, що пожежа виникає в центрі кімнати та умовно рівновіддалена від всіх стін приміщення, пожежне навантаження якого становить  $365 \text{ кВт/м}^2$  із максимальною температурою горіння  $1190 \text{ }^\circ\text{C}$ . Поширення полум'я по приміщенні відбувається із швидкістю  $0,22 \text{ м/с}$ , що відповідає рекомендаціям [14-16]. Під час проведення розрахунків не враховувалась робота систем пожежогашіння або димовидалення, тобто пожежа вільно розвивалася упродовж всієї тривалості моделювання.

На рис. 1 наведено базову модель фрагмента висотної будівлі та модель приміщення із пожежним навантаженням, в якому змодельовано пожежу.



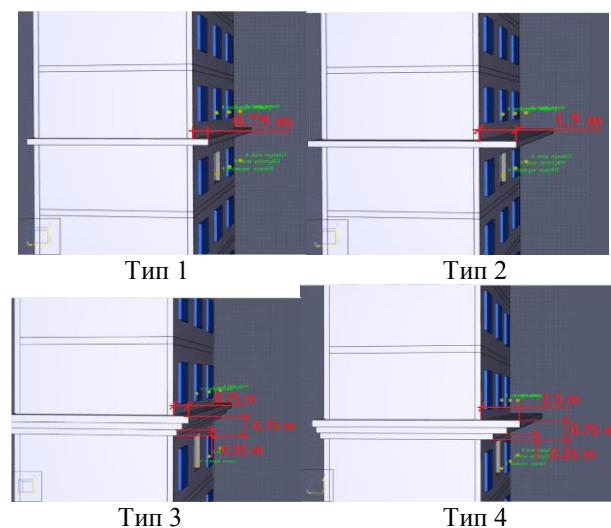
**Рисунок 1** – Модель будівлі та місце початкового осередку пожежі під час проведення досліджень: 1 – осередок пожежі в приміщенні

За критерій граничного значення температури прогрівання поверхні фасаду будинку прийнято значення  $250 \text{ }^\circ\text{C}$ , що відповідає температурі деформації конструкції матеріалу з найменшим температурним опором, а саме конструкції металопластикових вікон згідно з даними [17].

Під час проведення моделювання ефективності фасадних протипожежних карнизів для запобігання поширенню пожежі вертикальними будівельними конструкціями у висотних будівлях досліджувалися такі їх типи за конструктивними формами:

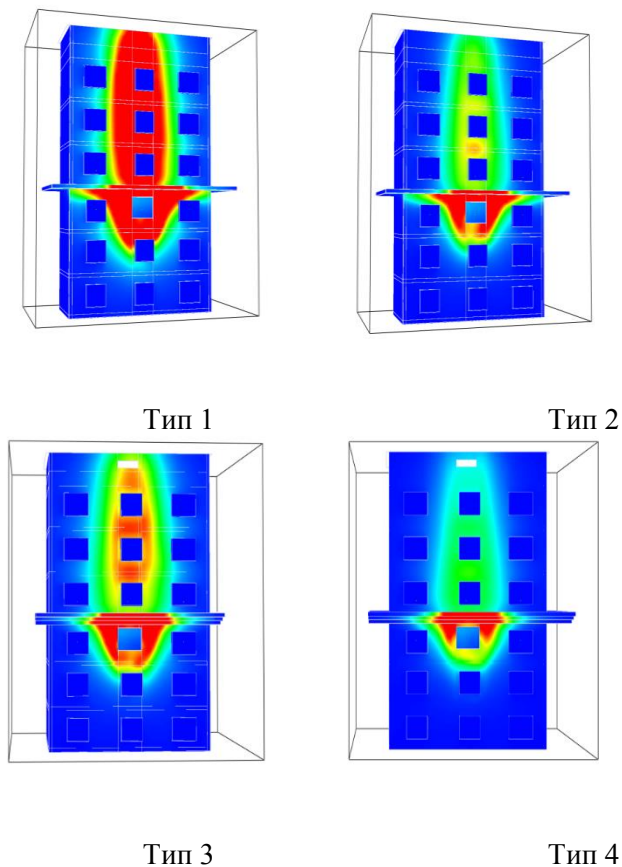
- тип 1, прямий протипожежний карниз по контуру будинку, який виступає за межі фасаду на  $0,75 \text{ м}$ ;
- тип 2, прямий протипожежний карниз по контуру будинку, який виступає за межі фасаду на  $1,5 \text{ м}$ ;
- тип 3, обтічний восьмикутний карниз по контуру будинку, який виступає за межі фасаду на  $0,75 \text{ м}$ ;
- тип 4, обтічний восьмикутний карниз по контуру будинку, який виступає за межі фасаду на  $1,5 \text{ м}$ ;

На рис. 2 наведено досліджувані моделі фасадних протипожежних карнизів.



**Рисунок 2** – Досліджувані моделі фасадних протипожежних карнизів

Загальна тривалість розрахунків становила  $1200 \text{ с}$ , що обумовлено нормативним часом прибуття пожежно-рятувальних підрозділів для міста ( $10 \text{ хв}$ ) згідно з [18], а також додатковий запас часу на розгортання сил та засобів пожежно-рятувальних підрозділів для ліквідації пожежі (також  $10 \text{ хв}$ ). За результатами моделювання, побудовано температурні розподіли прогріву фасаду розрахункової моделі. Результати моделювання, а також візуалізацію пожежі наведено на рис. 3.



**Рисунок 3** – Результати температурних розподілів прогріву фасаду розрахункових моделей

За результатами моделювання виявлено закономірність збільшення площі прогріву фасаду для прямих карнизів не обтічної форми, при цьому наявність протипожежного карниза на фасаді будівлі прямої форми не повністю запобігає поширенню теплового впливу під час пожежі, як по вертикалі так і по горизонталі, але значно зменшує його максимальне значення та збільшує тривалість прогрівання поверхні фасаду. Також підтверджено припущення, викладене в [7], що прямий контакт турбулентного теплового потоку від пожежі з перешкодою необтічної форми збільшує площу критичного прогріву фасаду будинку під протипожежним карнизом та над ним фактично на 30-35 % за даних умов моделі будинку.

Результати цього моделювання підтверджують значний вплив форми протипожежних фасадних карнизів на ефективність запобігання поширенню пожежі вертикальними будівельними конструкціями, а саме застосування карнизів обтічної форми є найбільш ефективним конструктивним заходом.

**Висновки.** Таким чином, за даних умов моделювання, встановлено, що наявність протипожежного фасадного карниза з виступом 0,75 м та 1,5 м є ефективним засобом, що може обмежувати температурний вплив від пожежі на рівні верхнього поверху під яким вона виникла з 870 °С до 450 °С та 270 °С

відповідно. Разом із тим, пряма форма протипожежного фасадного карнизу збільшує площу температурного розподілу прогріву конструкції поверхні фасаду в межах на 30-35 % за даних умов моделювання та для даних об'ємно-планувальних рішень фасаду висотного будинку. Разом із тим, пряма форма карниза збільшує площу температурного розподілу прогріву конструкції поверхні фасаду в межах на 30-35 % за даних умов моделювання та для даних об'ємно-планувальних рішень фасаду висотного будинку.

Виявлено, що за даних умов моделювання температура поверхні фасаду для верхнього поверху, який розташований над поверхом де виникла пожежа, за наявності протипожежного карнизу обтічної форми знижується з 270 °С ( $\pm 30^\circ\text{C}$ ) до 180 °С ( $\pm 10^\circ\text{C}$ ), що може суттєво впливати на забезпечення умов обмеження подальшого поширення пожежі.

Дослідження ефективності відведення теплового потоку від фасаду та ефективності протипожежних фасадних карнизів на запобігання поширенню пожежі вертикальними будівельними конструкціями висотних будівель, а також виведення коефіцієнтів ефективності в залежності від форми або їх типу, може бути предметом подальшого дослідження, в тому числі натурних випробувань.

#### Список літератури

1. Яковчук Р., Кузик А., Смельяненко С. і Скоробагатко Т. Механізм поширення пожежі поверхнею конструкцій зовнішніх стін із фасадною теплоізоляцією з горючим утеплювачем та опорядженням штукатуркою. *Пожежна безпека*. 2019. №34. С. 96-103. <https://doi.org/https://doi.org/10.32447/20786662.34.2019.16>.
2. Fire hazards of External wall assemblies Containing Combustible Components Final Report Prepared by: Nathan White CSIRO Highett, VIC, Australia Michael Delichatsios FireSert, University of Ulster Jordanstown, Northern Ireland © June 2014 Fire Protection Research Foundation.
3. Яковчук Р., Кузик А., Міллер О. і Лин А. Теплоізоляційно-оздоблювальні системи фасадів будинків як фактор підвищеної пожежної небезпеки. *Пожежна безпека*. 2018. №32. С. 80-89. <https://doi.org/https://doi.org/10.32447/20786662.32.2018.12>
4. Балло Я.В., Яковчук Р.С., Ніжник В.В., Сізіков О.О., Кузик А.Д. (2021). Дослідження конструктивних параметрів протипожежних карнизів для запобігання поширенню пожежі фасадними конструкціями висотних будинків. *Пожежна безпека*. № 37. С. 16-23. <https://doi.org/https://doi.org/10.32447/20786662.37.2020.03>.
5. Одинець А.В., Балло Я.В., Голікова С.Ю., Несенок Л.П. (2020). Аналіз стану з пожежами у висотних будинках в Україні. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. № 2 (10). С. 91-102. <https://doi.org/10.33269/nvcz.2020.2.91-102>

6. ДБН В.2.2-41:2019 Висотні будівлі. Основні положення. Вид. офіц. Київ: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України. 2019, 59 с.

7. ДБН В.1.1-7:2016 Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги. Вид. офіц. Київ: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України. 2016, 39 с.

8. Morgado, H.J.L. and Rodrigues, J.P.C. (2015). Balcony Effect on the External Fire Spread into Upper Floors, *Journal of Structural Fire Engineering*, Vol. 6 No. 4, pp. 255-274. <https://doi.org/10.1260/2040-2317.6.4.255>

9. Morgado, H.J., Rodrigues, J.P., & Laím, L. (2015). Experimental and numerical study of balcony effect in external fire spread into upper floors. *Applications of Structural Fire Engineering*.

10. Čolić, A., Pečur, I.B. (2020). Influence of Horizontal and Vertical Barriers on Fire Development for Ventilated Façades. *Fire Technol* 56, 1725–1754. <https://doi.org/10.1007/s10694-020-00950-w>

11. Markus Nilsson, Bjarne Husted, Axel Mossberg, Johan Anderson, Robert Jansson McNamee (2018). A numerical comparison of protective measures against external fire spread. *Fire and Materials* (IF 1.925), DOI: 10.1002/fam.2527

12. Markus Nilsson (2016). The impact of horizontal projections on external fire spread - A numerical comparative study. DOI:10.13140/RG.2.2.27432.57600

13. Marija J.R., Milan Carević, Ivana Banjad Pečur, Fire protection of façades, University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering Zagreb, Croatia (2017) 26-35.

14. McGrattan, K., et al., Fire Dynamics Simulator User's Guide, FDS Version 6.2.0, SVN Repository Revision: 22352, NIST Special Publication 1019, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD USA, April 2015

15. Fire Dynamics Simulator. Technical Reference Guide. Volume 1: Mathematical Model / NIST Special Publication 1018-1. Sixth Edition. 2015.

16. Fire Dynamics Simulator. Technical Reference Guide. Volume 3: Validation / NIST Special Publication 1018-3. Sixth Edition. 2015.

17. Температура плавления и размягчения пластиков, температура эксплуатации пластмасс / Теплопроводность строительных материалов, их плотность и теплоемкость [Электронный ресурс]: 2019. Режим доступа до сайту.: <http://thermalinfo.ru/svoystva-materialov/plastmassa-i-plastik/temperatura-plavleniya-i-razmyagcheniya-plastikov-temperatura-ekspluatatsii-plastmass>.

18. ДБН Б.2.2-12:2019 Планування і забудова територій. Вид. офіц. Київ: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України. 2019, 185 с.

## References

1. Yakovchuk, R., Kuzyk, A., Yemelyanenko, S., & Skorobagatko, T. (2019). Fire spread mechanism on surface of construction fit with façade heat insulation based on combustible insulant and finished with plaster. *Fire Safety*, (34), 96-103. <https://doi.org/https://doi.org/10.32447/20786662.34.2019.16>

2. Fire hazards of External wall assemblies Containing Combustible Components Final Report Prepared by: Nathan White CSIRO Highett, VIC, Australia Michael Delichatsios FireSert, University of Ulster Jordanstown, Northern Ireland © June 2014 Fire Protection Research Foundation.

3. Yakovchuk, R., Kuzyk, A., Miller, O., & Lyn, A. (2018). Heat insulation-apparatus systems of household facade as a factor of increased fire hazard. *Fire Safety*, (32), 80-89. <https://doi.org/https://doi.org/10.32447/20786662.32.2018.12>

4. Ya Ballo, R Yakovchuk, V Nizhnyk, O Sizikov, A Kuzyk (2020). Investigation of design parameters facade fire-preventing eaves for prevent the spread of fires on facade structures of high-rise buildings. *Fire Safety*, №37, 16-23. <https://doi.org/https://doi.org/10.32447/20786662.37.2020.03>.

5. A. Odynets, Y. Ballo, S. Golikova, L. Nesenjuk, Analysis of the condition with fire in high-rise buildings in Ukraine

6. ДБН В.2.2-41:2019 High-rise buildings. Substantive provisions. (2019). Kiev: Ministry of Regional Development, Construction and Housing and Communal Services of Ukraine (in Ukr.)

7. ДБН В.1.1-7:2016 Fire safety objects of construction. General requirements. (2016). Kiev: Ministry of Regional Development, Construction and Housing and Communal Services of Ukraine (in Ukr.)

8. Morgado, H.J.L. and Rodrigues, J.P.C. (2015). Balcony Effect on the External Fire Spread into Upper Floors, *Journal of Structural Fire Engineering*, Vol. 6 No. 4, pp. 255-274. <https://doi.org/10.1260/2040-2317.6.4.255>

9. Morgado, H.J., Rodrigues, J.P., & Laím, L. (2015). Experimental and numerical study of balcony effect in external fire spread into upper floors. *Applications of Structural Fire Engineering*.

10. Čolić, A., Pečur, I.B. (2020). Influence of Horizontal and Vertical Barriers on Fire Development for Ventilated Façades. *Fire Technol* 56, 1725–1754. <https://doi.org/10.1007/s10694-020-00950-w>

11. Markus Nilsson, Bjarne Husted, Axel Mossberg, Johan Anderson, Robert Jansson McNamee (2018). A numerical comparison of protective measures against external fire spread. *Fire and Materials* (IF 1.925), DOI: 10.1002/fam.2527

12. Markus Nilsson (2016). The impact of horizontal projections on external fire spread - A numerical comparative study. DOI:10.13140/RG.2.2.27432.57600

13. Marija J.R., Milan Carević, Ivana Banjad Pečur, Fire protection of façades, University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering Zagreb, Croatia (2017) 26-35.
14. McGrattan, K., et al., Fire Dynamics Simulator User's Guide, FDS Version 6.2.0, SVN Repository Revision: 22352, NIST Special Publication 1019, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD USA, April 2015
15. Fire Dynamics Simulator. Technical Reference Guide. Volume 1: Mathematical Model / NIST Special Publication 1018-1. Sixth Edition. 2015.
16. Fire Dynamics Simulator. Technical Reference Guide. Volume 3: Validation / NIST Special Publication 1018-3. Sixth Edition. 2015.
17. Melting and softening temperature of plastics, operating temperature of plastics. (2019). *Thermal conductivity of building materials, their density and heat capacity [Electronic resource]*. Access mode: <http://thermalinfo.ru/svoystva-materialov/plastmassa-i-plastik/temperatura-plavleniya-i-razmyagcheniya-plastikov-temperatura-ekspluatatsii-plastmass>.
18. DBN B.2.2-12:2019 Planning and development of territories. (2019). Kiev: Ministry of Regional Development, Construction and Housing and Communal Services of Ukraine (in Ukr.)

\* Науково-методична стаття