

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА УКРАЇНИ З НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

КОВАЛИШИН БОГДАН МИХАЙЛОВИЧ

УДК 614.841.334.1

ДИСЕРТАЦІЯ


**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАПОБІГАННЯ
ПОШИРЕННЮ ПОЖЕЖІ ЗЗОВНІ БУДІВЕЛЬ
ПРОТИПОЖЕЖНИМИ КАРНИЗАМИ**

261 – пожежна безпека

26 – цивільна безпека

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

 Б.М. Ковалишин

Науковий керівник:

Балло Ярослав В'ячеславович, доктор технічних наук, старший дослідник

Черкаси – 2026

АНОТАЦІЯ

Ковалишин Б.М. Підвищення ефективності запобігання поширенню пожежі ззовні будівель протипожежними карнизамі. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 261 – Пожежна безпека. – Національний університет цивільного захисту України, Державна служба України з надзвичайних ситуацій, Черкаси, 2026.

Дисертація присвячена вирішенню актуального науково-технічного завдання у сфері пожежної безпеки - розкриття закономірностей впливу параметрів протипожежних карнизів на запобігання поширенню пожежі ззовні будівлі на вище розташовані поверхи та різні функціональні зони будівлі як наукове підґрунтя підвищення пожежної безпеки висотних та багатофункціональних будівель і споруд.

У вступі сформульовано ідею роботи, обґрунтовано актуальність обраної теми, сформульовано мету, наукові задачі, об'єкт та предмет досліджень. Розкрито проблему існуючих підходів щодо забезпечення обмеження поширення пожежі при застосування протипожежних перешкод різних типів для захисту різних функціональних зон фасаду будівель. Здійснено обґрунтування її новизни роботи та приведено практичне значення отриманих результатів, представлено загальну характеристику дослідження. Зазначено особистий внесок здобувача, наведено дані про апробацію досліджень, публікації, структуру та обсяг роботи.

У першому розділі проведено аналіз пожеж, статистичні дані щодо їх масштабів, що супроводжувалися поширенням вогню ззовні будівлі із різними типами та конструктивним виконанням фасадних систем. Проведено аналіз впливу різних типів фасадних протипожежних перешкод на інтенсивність поширення зовнішньої пожежі, а також досліджено їх наслідки. Здійснено критичний аналіз існуючих методів оцінювання ефективності запобігання поширення пожежі по фасадам будівель із застосуванням натурних вогневих

випробувань та розрахункових методів.

На основі виявлених недоліків, встановлено можливість підвищення ефективності запобігання поширення пожежі ззовні будівель шляхом застосування більш ефективних протипожежних карнизами з покращеними конструктивними характеристиками для обмеження теплового впливу на вище розташовані поверхи. Результати проведеного аналізу літературних джерел та нормативних документів дали можливість сформулювати мету роботи й перелік завдань для її досягнення.

У другому розділі досліджені теоретичні підходи та методи, що описують процеси поширення пожежі зовнішніми огорожувальними конструкціями ззовні будівель та систематизовано чинники, які впливають на інтенсивність даних процесів. Здійснено якісний аналіз існуючих заходів щодо обмеження поширення пожежі при використанні обчислювальних методів комп'ютерної математики. Приведено математичні описи траєкторії поширення полум'я вертикально уздовж фасаду з умовами, які спонукають утворення ефекту його відриву від зовнішніх огорожувальних конструкцій. Визначено, що моделювання траєкторії можливого поширення зовнішньої пожежі доцільно використовувати підхід, який полягає в апроксимації кривої полум'я за допомогою чотирьох ламаних ліній (відрізків), які змінюються за рахунок зміни тиску Δp та швидкості потоку уздовж траєкторії u_m . На основі представлених залежностей та умов, при яких спостерігається ефект повторного приєднання полум'я до поверхні фасаду визначено рівняння балансу імпульсу енергій в горизонтальній проекції L_E для різних ділянок висоти фасаду, при цьому баланс швидкості змінюється у вертикальному напрямку через збільшення різниці тиску. Зроблено припущення, що в разі застосування у якості фасадних протипожежних перешкод (протипожежних карнизів) прямокутних виступів або багатогранних виступів загального прямокутного профілю, можливо створити зону найменшої швидкості від початкового імпульсу та максимального тиску поза зоною фасадної площини і таким чином уникнути

утворення точки повторного приєднання полум'я в зоні самого фасаду.

Запропоновано критеріальну базу, яка може характеризувати ефективність запобігання поширення пожежі ззовні будівель при використанні протипожежних карнизів різних типів для різних функціональних частин будівель та споруд.

У третьому розділі описано методологію програми досліджень поширення пожежі ззовні будівлі та дослідження умов запобігання її поширення, що застосовується за допомогою обчислювальної газо-гідродинаміки та комп'ютерного моделювання. В основі програми досліджень поширення пожежі ззовні будівлі та дослідження умов запобігання її поширення закладається принцип відтворення сценарію, коли вогонь вільно поширюється крізь вікно, уздовж фасаду, на вище розташований поверх та обмежується різними типами фасадних протипожежних перешкод. Програма експериментальних досліджень включала етап створення моделі вертикального фрагменту фасаду будівлі в межах двох поверхів, а саме поверху та віконного прорізу, де відбувається пожежа та поверху на який вона впливає і який захищається протипожежним карнизом. При цьому, створена комп'ютерна модель передбачає максимальне врахування всіх основних чинників, які впливають на процеси поширення зовнішньої пожежі. За результатом проведеної серії досліджень з використанням імітаційних моделей запропоновані шляхи удосконалення програми експериментальних натурних досліджень з оцінки запобігання поширення зовнішньої пожежі на вище розташований поверх. За допомогою комп'ютерних обчислювальних комплексів розроблено типові моделі та запропоновано ряд типових моделей протипожежних карнизів. При цьому розроблено конструктивні рішення для удосконалення експериментальної установки з прогнозування поширення пожежі по фасадам будівель для покращення точності оцінювання.

За результатом проведених досліджень підтверджено гіпотезу, що форма та конструктивні параметри протипожежних карнизів можуть значно впливати на ефективність обмеження поширення пожежі, а в окремих випадках їх форма може

бути причиною більш стрімкого поширення вогню на вище розташовані поверхи будівлі. Отримані дані дозволили узагальнити та систематизувати критерії, які характеризують ефективність обмеження поширення зовнішньої пожежі для різних функціональних частин будівель та споруд. Вперше виявлено залежності, які характеризують процеси, що безпосередньо впливають на поширення зовнішньої пожежі на вище розташовані поверхи для фасаду, який обладнано прямим протипожежним карнизом, карнизом з формою багатогранника, з формою трапеції, з формою «вінглету» та заокругленою формою виступу.

У четвертому розділі наведено результати експериментальних натурних вогневих досліджень з оцінювання впливу конструктивних параметрів протипожежних карнизів на ефективність запобігання поширення пожежі ззовні фасаду будівлі. Експериментально доведено, що протипожежний карниз з у формі «вінглету» дозволяє забезпечити максимальне значення тиску в зоні фасаду (в межах 14,5-15,5 Па) при достатньому значенні швидкості висхідного потоку (в межах 3-5 м/с). Дані характеристики забезпечують найбільшу відносну ефективність за критерієм максимальної площі критичного прогріву (не більше 12% від всієї захищеної площі фасаду) та найменший діапазон температур на його поверхні. Порівняння отриманих даних з даними отриманими для базової моделі (фасад без карнизу) показали, що застосування протипожежного карнизу у формі «вінглету» навіть при його ширині виступу до 0,3 м дозволяє знизити максимальне значення температури біля поверхні фасаду до 35%, а площу критичного прогріву досліджуваного фрагменту фасаду фактично в рази.

За результатом проведеної серії досліджень запропоновано перелік критеріїв, які в сукупності характеризують визначення відносної ефективності протипожежних карнизів різних конструктивних типів в частині їх ефективності обмеження поширення пожежі по негорючим фасадам будівель, а також відповідні засоби вимірювальної техніки для проведення оцінювання. За результатом отриманих експериментальних даних, здійснено оцінювання ефективності обмеження поширення пожежі протипожежним карнизом із застосуванням

параметричного методу на прикладі реального об'єкту будівництва. Порівняння отриманих даних з результатами комп'ютерного моделювання свідчать, що за показником площі критичного прогріву середня похибка за результатом серії трьох вогневих досліджень не перевищила 14 %, що є прийнятним для даного масштабу фрагменту фасаду та супутніх чинників, які впливають на відтворюваність експерименту.

Результати досліджень узагальнено та систематизовано у відносні показники ефективності протипожежних карнизів, які наведені у відповідній довідковій таблиці.

У п'ятому розділі наведено методологію підбору типу протипожежного карнизу для ефективного захисту різних функціональних зон будівлі, в основі якої закладено принцип забезпечення перешкоджання вільному вертикальному поширенню полум'я по фасаду будівлі, захисту верхніх віконних прорізів від дії теплового потоку та інших небезпечних чинників пожежі, а також локалізації пожежі в межах окремих поверхів для створення прийнятних умов ліквідації пожежі пожежно-рятувальними підрозділами. Наведено схему методологічного підходу щодо вибору типу протипожежного карнизу для ефективного захисту різних функціональних зон фасаду будівлі.

На прикладі об'єкту висотної громадської будівлі проведено оцінювання економічного ефекту від застосування протипожежних карнизів з нормативною шириною виступу 0,75 м, а саме для прямого протипожежного карнизу, протипожежного карнизу з формою «вінглету» та для громадської будівлі, яка не обладнана карнизом. Застосування розробленого алгоритму підбору фасадних протипожежних перешкод продемонструвало, що загальну суму прямих збитків від руйнування конструкції фасаду від зовнішньої пожежі можливо зменшити до 29% у порівнянні з існуючими методами застосування фасадних протипожежних перешкод.

Наукова новизна дисертаційної роботи полягає у розкритті закономірностей впливу конструктивних характеристик протипожежних

карнизів на процеси запобігання поширенню пожежі ззовні будівлі на вище розташовані поверхи та функціональні частини будівлі, при цьому:

1. Вперше розроблено математичну модель руху полум'я та розігрітих газів, утворених під час пожежі при взаємодії з протипожежним карнизом з багатограничними виступами, відмінністю якої є врахування впливу геометрії карнизу на параметри конвективного потоку, що забезпечує зниження його тиску та швидкості до 60 % і унеможлиблює повторне приєднання полум'я до фасаду будівлі.

2. Вперше встановлено залежності впливу фасадних протипожежних перешкод заокругленої форми шириною 0,3–0,75 м на параметри висхідного конвективного потоку під час пожежі з питомим тепловим навантаженням 300–780 МДж/м², відмінністю яких є врахування формування зони підвищеного тиску та швидкості потоку, що забезпечує зниження температури на зовнішній поверхні стіни у 2,2–2,5 рази на висоті до 1,7 м.

3. Вперше розроблено експериментальну установку для дослідження процесів поширення пожежі по фасаду будівлі, відмінністю якої є відтворення фрагменту фасадної системи з імітацією вогневого осередку реальної пожежі та можливістю встановлення протипожежних карнизів різних конструктивних типів, що забезпечує визначення температурних режимів, параметрів висхідного конвективного потоку та оцінювання ефективності обмеження поширення пожежі.

4. Набула подальшого розвитку методика прогнозування поширення пожежі зовнішніми огорожувальними конструкціями будівель та її обмеження фасадними протипожежними перешкодами різних типів конструктивного виконання.

Ключові слова: пожежна безпека, протипожежний карниз, запобігання поширенню пожежі, захист будівлі, комп'ютерне моделювання поширення пожежі, температурний режим, пожежонебезпечні ситуації.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях України:

1. Коробкін В., Коваленко В., **Ковалишин Б.** Аналіз вимог та методів випробувань покрівель та покрівельних матеріалів на пожежну небезпеку. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2019. № 1 (7). С. 47–53.

Особистий внесок – проаналізовано існуючі методи лабораторних вогневих випробувань та сформульовано задачі досліджень.

2. Балло Я., **Ковалишин Б.** Експериментальні дослідження з визначення ефективності протипожежних карнизів різної форми. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2024. № 2 (18). С. 35–44.

Особистий внесок – розроблено методику експериментальних досліджень, опрацьовано результати та сформульовано висновки.

3. **Ковалишин Б.**, Балло Я., Ніжник В., Стилик І., Кагітін О. Перспективні напрями підвищення ефективності обмеження поширення пожежі по зовнішніх огорожувальних конструкціях. *Пожежна безпека*. 2024. Т. 44. С. 20–29.

Особистий внесок – визначено недоліки існуючих фасадних протипожежних перешкод та сформульовано гіпотезу щодо потенційної можливості удосконалення обмеження зовнішньої пожежі.

4. Балло Я., **Ковалишин Б.** Дослідження процесів обмеження поширення пожежі ззовні будівлі за допомогою обчислювальної газо-гідродинаміки. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2025. № 1 (19). С. 31–43.

Особистий внесок – створено та обґрунтовано параметри комп'ютерної моделі, а також визначено критерії оцінювання ефективності обмеження поширення пожежі протипожежними карнизами.

Публікації у виданнях, що входять до міжнародної наукометричної бази Scopus та Web of Science

5. Kagitin O., Veselivskiy R., Havrys A., Ballo Y., Yakovchuk R., **Kovalyshyn B.** Determining the influence of façade parameters and the width of a fire-proof eaves on preventing the spread of fire through external vertical structures of buildings. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. Vol. 4, № 1 (130). P. 6–16.

Особистий внесок – сформульовано задачі досліджень та здійснено порівняльний аналіз отриманих результатів, які стали основою для формулювання висновків.

6. Nizhnyk V., Skorobahatko T., Mykhailov V., Ballo Y., Sereda D., **Kovalyshyn B.**, Palchykov R., Demkiv A., Otrosh V., Shcholokov E. Current state of research and normative framework regarding assessment of fire alarm systems suitability for operation. *Ad Alta: Journal of interdisciplinary research*. 2024. Vol. 14, Iss. 1, spec. issue XLI. P. 245–249.

Особистий внесок – здійснено обґрунтування впливу наявності систем протипожежного захисту на динаміку та тривалість розвитку пожежі, яка може поширитися із внутрішнього простору приміщення назовні фасаду будівлі.

Публікації, які засвідчують апробацію дисертації

7. **Ковалишин Б.**, Балло Я. До питань підвищення ефективності запобігання поширення пожежі протипожежними карнизами. *Проблеми та перспективи розвитку системи безпеки життєдіяльності: XIX Міжнародна науково-практична конференція молодих вчених, курсантів та студентів (28-29 берез. 2024)*. Львів: ЛДУ БЖД, 2024. С. 147–150.

Особистий внесок – досліджено вплив конструктивних параметрів протипожежних карнизів на ефективність обмеження поширення пожежі.

8. Балло Я., **Ковалишин Б.** Удосконалення установки для прогнозування

поширення пожежі по фасадам будівель. *Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій: XV Міжнародна науково-практична конференція* (24 квіт. 2024). Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2024. С. 126–127.

Особистий внесок – проведено моделювання поширення пожежі зовнішніми огорожувальними конструкціями.

9. **Ковалишин Б.**, Балло Я. Дослідження впливу конструктивних параметрів протипожежних карнизів на процеси поширення пожежі. *Надзвичайні ситуації: безпека та захист: XIV Всеукраїнська науково-практична конференція з міжнародною участю* (24-25 жовт. 2024). Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2024. С. 102–103.

Особистий внесок – досліджено вплив форми, виносу карниза від стіни та інших геометричних параметрів на ефективність затримки поширення вогню.

10. Климась Р., Михайлова А., **Ковалишин Б.** Аналіз вітчизняного та зарубіжного досвіду проведення оцінки стану захищеності об'єктів критичної інфраструктури. *Екологічна безпека в умовах війни: збірник тез доповідей V Міжнародної науково практичної конференції* (21 лист. 2024). Львів: ЛДУБЖД, 2024. С. 188–190.

Особистий внесок – проведено порівняльний аналіз підходів до оцінки безпеки та формування планів захисту об'єктів критичної інфраструктури в Україні.

11. **Ковалишин Б.**, Балло Я. Програма-методика експериментальних вогневих досліджень з оцінювання обмеження поширення пожежі протипожежним карнизом. *Проблеми надзвичайних ситуацій: Міжнародна науково-практична конференція* (14 трав. 2025). Черкаси: НУЦЗ України, 2025. С. 52–53.

Особистий внесок – розробка стандартизованого підходу для перевірки того, наскільки ефективно карниз зупиняє вертикальне поширення вогню по

фасаду будівлі.

12. Балло Я., Ковалишин Б. Формування програми досліджень поширення пожежі ззовні будівлі та дослідження умов запобігання її поширення. *Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій: Матеріали XVI Міжнародної науково-практичної конференції (2 трав. 2025). Черкаси: НУЦЗ України, 2025. С. 242–243.*

Особистий внесок – аналіз чинників, які стримують поширення пожежі ззовні будівлі.

SUMMARY

Kovalyshyn B.M. Increasing the effectiveness of preventing the spread of fire from outside buildings by fire-fighting cornices. – Qualification scientific work in the form of a manuscript.

The dissertation is submitted for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 261 – Fire Safety. – National University of Civil Protection of Ukraine of the State Emergency Service of Ukraine, Cherkasy, 2026.

The dissertation is dedicated to solving a relevant scientific and technical problem in the field of fire safety - revealing the patterns of influence of fire protection cornice parameters on preventing the spread of fire from outside the building to higher floors and various functional areas of the building as a scientific basis for improving the fire safety of high-rise and multifunctional buildings and structures.

The introduction describes the general idea of the work, justifies the relevance of the chosen topic, formulates the goal, scientific tasks, object and subject of research. The problem of existing approaches to ensuring the limitation of the spread of fire when using fire barriers of various types to protect different functional zones of the facade of buildings is revealed. The novelty of the work is substantiated and the practical significance of the results obtained is given, a general characteristic of the research is presented. The personal contribution of the applicant is indicated, data on the testing of research, publications, structure and scope of work are given.

In the first chapter, an analysis of fires is carried out, statistical data on their scale are provided, which were accompanied by the spread of fire from outside the building with different types and constructive design of facade systems. An analysis of the influence of different types of facade fire barriers on the intensity of the spread of external fire is carried out, and their consequences are also studied. A critical analysis of existing methods for assessing the effectiveness of preventing the spread of fire on building facades is carried out using full-scale fire tests and calculation methods.

Based on the identified shortcomings, it was established that it is possible to increase the effectiveness of preventing the spread of fire from outside buildings by using more effective fire-fighting cornices with improved design characteristics to limit the thermal impact on the floors above. The results of the analysis of literary sources and regulatory documents made it possible to formulate the goal of the work and a list of tasks for its achievement.

In the second chapter, theoretical approaches and methods describing the processes of fire spread by external enclosing structures from outside buildings are investigated and factors that affect the intensity of these processes are systematized. A qualitative analysis of existing measures to limit the spread of fire using computational methods of computer mathematics is carried out. Mathematical descriptions of the trajectory of flame spread vertically along the facade with conditions that induce the formation of the effect of its separation from external enclosing structures are given. It was determined that for modeling the trajectory of possible external fire propagation, it is advisable to use an approach that consists in approximating the flame curve using four broken lines (segments), which change due to changes in pressure Δp and flow velocity along the trajectory u_m . Based on the presented dependencies and conditions under which the effect of flame reattachment to the facade surface is observed, the equation of the energy momentum balance in the horizontal projection LE for different sections of the facade height is determined, while the velocity balance changes in the vertical direction due to an increase in the

pressure difference. It is assumed that if rectangular protrusions or multifaceted protrusions of a general rectangular profile are used as facade fire barriers (fire cornices), it is possible to create a zone of the lowest velocity from the initial impulse and maximum pressure outside the zone of the facade plane and thus avoid the formation of a flame reattachment point in the zone of the facade itself.

A criteria base is proposed that can characterize the effectiveness of preventing the spread of fire from outside buildings when using fire-resistant cornices of various types for different functional parts of buildings and structures.

In the third chapter, the methodology of the program for studying the spread of fire from outside the building and studying the conditions for preventing its spread, which is applied using computational gas-hydrodynamics and computer modeling. The program for studying the spread of fire from outside the building and studying the conditions for preventing its spread is based on the principle of reproducing a scenario when fire spreads freely through a window, along the facade, to the floor above and is limited by various types of facade fire barriers. The experimental research program included the stage of creating a model of a vertical fragment of the building facade within two floors, namely the floor and window opening where the fire occurs and the floor on which it affects and which is protected by a fire cornice. At the same time, the created computer model assumes maximum consideration of all the main factors that affect the processes of external fire spread. Based on the results of a series of studies using simulation models, ways to improve the program of experimental field studies to assess the prevention of the spread of external fire to the floor above are proposed. Using computer computing complexes, typical models have been developed and a number of typical models of fire-fighting cornices have been proposed. At the same time, constructive solutions have been developed to improve the experimental setup for predicting the spread of fire on building facades to improve the accuracy of the assessment.

The results of the conducted research confirmed the hypothesis that the shape and constructive parameters of fire-fighting cornices can significantly affect the

effectiveness of limiting the spread of fire, and in some cases their shape can be the cause of a more rapid spread of fire to the upper floors of the building. The data obtained allowed us to generalize and systematize the criteria that characterize the effectiveness of limiting the spread of external fire for various functional parts of buildings and structures. For the first time, dependencies have been identified that characterize the processes that directly affect the spread of external fire to the upper floors for a facade equipped with a straight fire-fighting cornice, a cornice with a polyhedron shape, a trapezoid shape, a "winglet" shape, and a rounded protrusion shape.

In the fourth chapter, presents the results of experimental field fire studies to assess the impact of the design parameters of fire-fighting cornices on the effectiveness of preventing the spread of fire from the outside of the building facade. It has been experimentally proven that a fire-fighting cornice in the form of a "winglet" allows for the maximum pressure value in the facade area (within 14.5-15.5 Pa) with a sufficient value of the upward flow velocity (within 3-5 m/s). These characteristics provide the highest relative efficiency according to the criterion of the maximum critical heating area (no more than 12% of the entire protected facade area) and the smallest temperature range on its surface. Comparison of the obtained data with the data obtained for the base model (facade without a cornice) showed that the use of a fire-fighting cornice in the form of a "winglet" even with its protrusion width of up to 0.3 m allows for a reduction in the maximum temperature value near the facade surface by up to 35%, and the critical heating area of the studied facade fragment is actually several times greater.

As a result of the conducted series of studies, a list of criteria was proposed, which together characterize the determination of the relative effectiveness of fire-fighting cornices of different structural types in terms of their effectiveness in limiting the spread of fire on non-combustible facades of buildings, as well as the corresponding measuring equipment for conducting the assessment. As a result of the experimental data obtained, the effectiveness of limiting the spread of fire by a fire-

fighting cornice was assessed using the parametric method on the example of a real construction site. Comparison of the obtained data with the results of computer modeling shows that the average error in the area of critical heating according to the result of a series of three fire studies did not exceed 14%, which is acceptable for a given scale of the facade fragment and related factors that affect the reproducibility of the experiment.

The results of the studies were summarized and systematized into relative indicators of the effectiveness of fire-fighting cornices, which are given in the corresponding reference table.

In the fifth chapter, presents a methodology for selecting the type of fire-fighting cornice for effective protection of various functional areas of a building, based on the principle of preventing the free vertical spread of flame along the facade of the building, protecting the upper window openings from the action of heat flow and other dangerous fire factors, as well as localizing the fire within individual floors to create acceptable conditions for fire extinguishing by fire and rescue units. A scheme of a methodological approach to selecting the type of fire-fighting cornice for effective protection of various functional areas of the facade of a building is presented.

Using the example of a high-rise public building, an assessment of the economic effect of using fire-fighting cornices with a standard protrusion width of 0.75 m was carried out, namely for a straight fire-fighting cornice, a fire-fighting cornice with a “winglet” shape and for a public building that is not equipped with a cornice. The application of the developed algorithm for selecting facade fire barriers has demonstrated that the total amount of direct damage from the destruction of the facade structure from an external fire can be reduced by up to 29% compared to existing methods of using facade fire barriers.

The scientific novelty of the dissertation work lies in revealing the patterns of influence of the structural characteristics of fire-fighting cornices on the processes of preventing the spread of fire from outside the building to higher floors and functional parts of the building, while:

1. For the first time, a mathematical model of the movement of combustion products formed during a fire when interacting with a fire-fighting cornice with multifaceted protrusions has been developed, the difference of which is that it takes into account the influence of the cornice geometry on the parameters of the convective flow, which ensures a reduction in its pressure and velocity by up to 60% and makes it impossible for the flame to reattach to the building facade.

2. For the first time, the dependences of the influence of facade fire barriers of a rounded shape with a width of 0.3–0.75 m on the parameters of the ascending convective flow during a fire with a specific heat load of 300–780 MJ/m² were established, the difference of which is the consideration of the formation of a zone of increased pressure and flow velocity, which ensures a temperature decrease on the outer surface of the wall by 2.2–2.5 times at a height of up to 1.7 m.

3. For the first time, an experimental setup has been developed to study the processes of fire spread along the facade of a building, the difference of which is the reproduction of a fragment of the facade system with an imitation of the fire center of a real fire and the possibility of installing fire-fighting cornices of various structural types, which ensures the determination of temperature regimes, parameters of the ascending convective flow and assessment of the effectiveness of limiting the spread of fire.

4. Further development took place the methodology for predicting the spread of fire through external building envelopes and its limitation by facade fire barriers of various types of design.

Keywords: fire safety, fire cornice, prevention of fire spread, fire protection of the building, computer modeling of fire spread.

LIST OF PUBLISHED WORKS ON THE THEME OF THE DISSERTATION

Articles in scientific and professional publications of Ukraine

1. Korobkin V., Kovalenko V., **Kovalyshyn B.** Analysis of requirements and methods of testing roofs and roofing materials for fire hazard. *Scientific Bulletin: Civil Protection and Fire Safety*. 2019. No. 1 (7). P. 47–53.

Personal contribution – existing methods of laboratory fire tests were analyzed and research objectives were formulated.

2. Ballo Ya., **Kovalyshyn B.** Experimental studies on determining the effectiveness of fire-fighting cornices of various shapes. *Scientific Bulletin: Civil Protection and Fire Safety*. 2024. No. 2 (18). P. 35–44.

Personal contribution – developed a methodology for experimental research, processed the results, and formulated conclusions.

3. **Kovalyshyn B.**, Ballo Ya., Nizhnyk V., Stylyk I., Kagitin O. Promising directions for increasing the efficiency of limiting the spread of fire in external enclosing structures. *Fire Safety*. 2024. Vol. 44. P. 20–29.

Personal contribution – identified shortcomings of existing facade fire barriers and formulated a hypothesis regarding the potential for improving external fire containment.

4. Ballo Ya., **Kovalyshyn B.** Research on the processes of limiting the spread of fire from outside the building using computational gas-hydrodynamics. *Scientific Bulletin: Civil Protection and Fire Safety*. 2025. No. 1 (19). P. 31–43.

Personal contribution – created and justified the parameters of the computer model, and also determined the criteria for assessing the effectiveness of limiting the spread of fire by fire-fighting cornices.

Publications in scientific publications included in the Scopus and Web of Science database:

5. Kagitin O., Veselivskyi R., Havrys A., Ballo Y., Yakovchuk R.,

Kovalyshyn B. Determining the influence of façade parameters and the width of a fire-proof eaves on preventing the spread of fire through external vertical structures of buildings. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. Vol. 4, № 1 (130). P. 6–16.

Personal contribution – research objectives were formulated and a comparative analysis of the results obtained was carried out, which became the basis for formulating conclusions.

6. Nizhnyk V., Skorobahatko T., Mykhailov V., Ballo Y., Sereda D., **Kovalyshyn B.**, Palchykov R., Demkiv A., Otrosh V., Shcholokov E. Current state of research and normative framework regarding assessment of fire alarm systems suitability for operation. *Ad Alta: Journal of interdisciplinary research*. 2024. Vol. 14, Iss. 1, spec. issue XLI. P. 245–249.

Personal contribution – a justification was made of the impact of the presence of fire protection systems on the dynamics and duration of fire development, which can spread from the interior of the premises to the outside of the building facade.

Materials of scientific and practical conferences certifying the approval of the dissertation:

7. **Kovalyshyn B.**, Ballo Ya. On the issues of increasing the effectiveness of preventing the spread of fire by fire cornices. *Problems and prospects for the development of the life safety system: XIX International Scientific and Practical Conference of Young Scientists, Cadets and Students (March 28-29, 2024)*. Lviv: LDU BZH, 2024. P. 147–150.

Personal contribution – the influence of the design parameters of fire cornices on the effectiveness of limiting the spread of fire was studied.

8. Ballo Ya., **Kovalyshyn B.** Improvement of the installation for predicting the spread of fire along the façades of buildings. *Theory and practice of fire extinguishing and emergency response: XV International Scientific and Practical Conference (April 24, 2024)*. Cherkasy: CHIPB named after Heroes of Chernobyl, National University

of Civil Defence of Ukraine, 2024. P. 126–127.

Personal contribution – modeling of the spread of fire through external enclosing structures was carried out.

9. **Kovalyshyn B.**, Ballo Ya. Research on the influence of the design parameters of fire-fighting cornices on the processes of fire spread. *Emergency situations: safety and protection: XIV All-Ukrainian scientific and practical conference with international participation (October 24-25, 2024)*. Cherkasy: CHIPB named after Heroes of Chernobyl, National University of Civil Defence of Ukraine, 2024. P. 102–103.

Personal contribution – the influence of the shape, removal of the cornice from the wall and other geometric parameters on the effectiveness of delaying the spread of fire was studied.

10. Klymas R., Mykhaylova A., **Kovalyshyn B.** Analysis of domestic and foreign experience in assessing the security status of critical infrastructure facilities. *Environmental safety in wartime: collection of abstracts of the V International Scientific and Practical Conference (November 21, 2024)*. Lviv: LDUBZHD, 2024. P. 188–190.

Personal contribution – a comparative analysis of approaches to security assessment and the formation of protection plans for critical infrastructure facilities in Ukraine was conducted.

11. **Kovalyshyn B.**, Ballo Ya. Program-methodology of experimental fire research to assess the limitation of fire spread by a fire-fighting cornice. *Problems of emergency situations: International scientific and practical conference (May 14, 2025)*. Cherkasy: National University of Civil Defence of Ukraine, 2025. P. 52–53.

Personal contribution – development of a standardized approach to verify how effectively the cornice stops the vertical spread of fire along the facade of the building.

12. Ballo Ya., **Kovalyshyn B.** Formation of a research program for the spread of fire from outside the building and the study of conditions for preventing its spread. *Theory and practice of fire extinguishing and emergency response: Materials of the*

XVI International Scientific and Practical Conference (May 2, 2025). Cherkasy: National University of Civil Defence of Ukraine, 2025. P. 242–243.

Personal contribution – analysis of factors that restrain the spread of fire from outside the building.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	24
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПОЖЕЖ ЩО СУПРОВОДЖУВАЛИСЯ ПОШИРЕННЯМ ВОГНЮ ЗЗОВНІ БУДІВЛІ ТА ЇХ НАСЛІДКИ....	30
1.1. Аналіз статистичних даних про фасадні пожежі.....	30
1.2. Аналіз досвіду застосування протипожежних карнизів та протипожежних вертикальних бар'єрів в різних країнах.....	40
1.3. Аналіз наукових досліджень зовнішнього поширення пожежі та систематизація потенційних небезпек під час їх поширення.....	47
1.4. Висновки до розділу.....	53
РОЗДІЛ 2. ТЕОРІЯ ПРОЦЕСІВ ПОШИРЕННЯ ЗОВНІШНЬОЇ ПОЖЕЖІ ТА ПРИНЦИПИ ЇЇ ОБМЕЖЕННЯ.....	55
2.1. Математичні моделі траєкторії поширення полум'я крізь світлові прорізи.....	55
2.2. Числові алгоритми газо-гідродинамічних моделей динаміки поширення пожежі.....	63
2.3. Моделювання процесів обтікання газовим потоком твердих тіл	70
2.4. Висновки до розділу.....	77
РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ОБМЕЖЕННЯ ПОШИРЕННЯ ПОЖЕЖІ ЗЗОВНІ БУДІВЛІ ЗА ДОПОМОГОЮ ОБЧИСЛЮВАЛЬНОЇ ГАЗО-ГІДРОДИНАМІКИ.....	78
3.1. Формування програми досліджень поширення пожежі ззовні будівлі та дослідження умов запобігання її поширення.....	78
3.2. Створення базової обчислювальної моделі для моделювання процесів поширення пожежі ззовні фасаду.....	84
3.3. Моделювання процесів поширення пожежі ззовні фасаду обладнаного протипожежними карнизами найбільш поширених типів.....	92
3.4. Узагальнення експериментальних даних та виявлених	

залежностей.....	128
3.5. Висновки до розділу.....	132
РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ З ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОТИПОЖЕЖНИХ КАРНИЗІВ	135
4.1. Програма-методика експериментальних вогневих досліджень з оцінювання обмеження поширення пожежі протипожежними карнизом.....	135
4.2. Проведення експериментальних досліджень з визначення відносної ефективності протипожежних карнизів та аналіз отриманих результатів.....	143
4.3. Оцінювання ефективності обмеження поширення пожежі протипожежним карнизом із застосуванням параметричного методу на прикладі об'єкту будівництва.....	153
4.3.1. Загальна характеристика об'єкту дослідження.....	153
4.3.2. Розрахунковий сценарій пожежі та результати моделювання.....	157
4.4. Висновки до розділу.....	164
РОЗДІЛ 5. МЕТОДОЛОГІЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ОБМЕЖЕННЯ ПОШИРЕННЯ ЗОВНІШНЬОЇ ПОЖЕЖІ ПРИ ЗАСТОСУВАННІ ПРОТИПОЖЕЖНИХ КАРНИЗІВ РІЗНИХ ТИПІВ ТА ОЦІНКА ЇЇ ЕКОНОМІЧНОГО ЕФЕКТУ.....	166
5.1. Методологія підбору типу протипожежного карнизу для ефективного захисту функціональних зон будівлі.....	166
5.2. Основні підходи оцінки ефективності протипожежних карнизів під час використання розрахункових методів та натурних вогневих випробувань.....	170
5.3. Оцінка економічного ефекту на прикладі об'єкту будівництва.....	172
5.4. Висновки до розділу.....	177
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	179

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	182
ДОДАТОК А Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації.....	196
ДОДАТОК Б Акти впровадження результатів дисертації.....	200

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. Протипожежні карнизи є одним із найбільш ефективних засобів забезпечення обмеження поширення пожежі ззовні будівлі на вище розташовані поверхи або на покрівлю будівлі. Простота конструкції, відсутність особливих вимог до їх довготривалої експлуатації та утримання роблять їх найбільш застосовними фасадними протипожежними перешкодами, які широко застосовуються в сучасному будівництві. На відміну від активних систем протипожежного захисту фасадів, в застосуванні яких присутні ризики їх не спрацювання (відмови), а також численні взаємозв'язки із спорідненими системами, зокрема, електроживленням, протипожежним водопроводом, системами раннього виявлення пожежі тощо, протипожежні карнизи є абсолютно автономним протипожежним заходом, який може гарантувати свою працездатність в будь-який момент його експлуатації.

Питання обмеження поширення пожежі за допомогою фасадних протипожежних перешкод різних типів

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертація виконана згідно з основними напрямками наукової діяльності Інституту наукових досліджень з цивільного захисту Національного університету цивільного захисту України в рамках переліку науково-технічних (експериментальних) розробок в рамках виконання державного замовлення на найважливіші науково-технічні (експериментальні) розробки та науково-технічну продукцію у 2025-2026 роках затверджених розпорядженням Кабінету Міністрів України від 17 січня 2025 року № 38-р, Програми робіт з національної стандартизації на 2025 рік затвердженої наказом ДП «УкрНДНЦ» від 26 лютого 2025 року № 29, Угоди про асоціацію між Україною, з однієї сторони, та Європейським Союзом, Стратегії розвитку системи технічного регулювання на період до 2025 року затвердженої Розпорядженням Кабінету Міністрів України від 17.11.2020 № 443, замовленнями Департаменту

запобігання надзвичайним ситуаціям ДСНС України на науково-дослідні роботи «Обґрунтування параметрів прогнозування можливості запобігання поширення пожежі зовнішніми огорожувальними конструкціями будівель» (ДР № 0122U200790), де дисертаційне дослідження є складником технічного завдання науково дослідної роботи.

Метою роботи є розкриття закономірностей впливу параметрів протипожежних карнизів на запобігання поширенню пожежі ззовні будівлі на вище розташовані поверхи та різні функціональні зони будівлі, як наукове підґрунтя для удосконалення вимог їх пожежної безпеки.

Завдання досліджень:

1. Провести аналіз пожеж, які супроводжувалися зовнішнім поширенням полум'я уздовж фасаду та обґрунтувати напрями підвищення їх ефективності щодо обмеження вертикального поширення вогню.

2. Розробити математичну модель горіння фасадних систем, що дозволяє врахувати конструктивні параметри протипожежних карнизів для дослідження умов досягнення точки балансу тиску і швидкості теплового потоку та уникнення утворення точки повторного приєднання полум'я до фасаду.

3. На основі газо-гідродинамічної моделі, що основана на рівняннях теплообміну провести дослідження закономірностей впливу конструктивних параметрів протипожежних карнизів на ефективність запобігання вертикального поширення пожежі за визначеними критеріями оцінювання.

4. Провести експериментальні дослідження та визначити відносну обмежувальну ефективність протипожежних карнизів в залежності від їх типу та конструктивного виконання.

5. Розробити методику підбору протипожежних карнизів для захисту різних функціональних зон будівлі та перешкоджання вертикальному поширенню полум'я ззовні фасаду.

Об'єкт дослідження – процеси вертикального поширення пожежі ззовні будівлі на вище розташовані поверхи та функціональні зони будівель.

Предмет дослідження – конструктивні параметри протипожежних карнизів у процесах запобігання поширення пожежі ззовні будівлі.

Методи дослідження. В роботі застосовано комплексні методи досліджень, які включали: аналіз і синтез – для вивчення наукових праць, нормативної бази та узагальнення підходів до забезпечення захисту будівлі від зовнішнього поширення полум'я; аналіз довідкових даних і нормативних документів, якими регламентовано методи дослідження тепломасообміну між об'єктами та поширення пожежі по об'єктам; експериментальні дослідження з визначення впливу конструктивних параметрів протипожежних карнизів на процеси ефективного обмеження пожежі; комп'ютерне та математичне моделювання процесів тепломасообміну між осередком пожежі та зовнішньою огорожувальною конструкцією; чисельне моделювання динаміки вертикального поширення зовнішньої пожежі за допомогою програмного комплексу FDS; метод визначення середньо квадратичної похибки або середньоквадратичного відхилення; метод планування натурного та чисельного експерименту; методи математичної статистики для оброблення результатів експериментальних досліджень.

Наукова новизна дисертаційної роботи полягає у розкритті закономірностей впливу конструктивних характеристик протипожежних карнизів на процеси запобігання поширення пожежі ззовні будівлі на вище розташовані поверхи та різні функціональні частини будівлі, при цьому:

Вперше:

- розроблено математичну модель руху продуктів горіння, утворених під час пожежі при взаємодії з протипожежним карнизом з багатогранними виступами, відмінністю якої є врахування впливу геометрії карнизу на параметри конвективного потоку, що забезпечує зниження його тиску та швидкості до 60 % і унеможливорює повторне приєднання полум'я до фасаду будівлі.

- встановлено залежності впливу фасадних протипожежних перешкод

заокругленої форми шириною 0,3–0,75 м на параметри висхідного конвективного потоку під час пожежі з питомим тепловим навантаженням 300–780 МДж/м², відмінністю яких є врахування формування зони підвищеного тиску та швидкості потоку, що забезпечує зниження температури на зовнішній поверхні стіни у 2,2–2,5 рази на висоті до 1,7 м.

- розроблено експериментальну установку для дослідження процесів поширення пожежі по фасаду будівлі, відмінністю якої є відтворення фрагменту фасадної системи з імітацією вогневого осередку реальної пожежі та можливістю встановлення протипожежних карнизів різних конструктивних типів, що забезпечує визначення температурних режимів, параметрів висхідного конвективного потоку та оцінювання ефективності обмеження поширення пожежі.

Набуло подальшого розвитку:

методика прогнозування поширення пожежі зовнішніми огорожувальними конструкціями будівель та її обмеження фасадними протипожежними перешкодами різних типів конструктивного виконання.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій забезпечується: системним підходом до дослідження, науковою чесністю та точністю методів аналізу, з використанням достовірних вихідних даних, що отримані в результаті критичного аналізу теоретичних і експериментальних досліджень; доведеною збіжністю отриманих теоретичних результатів з результатами натурних вогневих досліджень; сукупністю науково обґрунтованих підходів, експериментальних підтверджень та незалежної апробації результатів; верифікацією результатів за допомогою сучасного програмного/математичного забезпечення; порівнянням отриманих закономірностей з Порівняння з відомими даними з аналогами в науковій літературі та результатами інших дослідників; публікацією результатів проведених досліджень у вітчизняних фахових та іноземних наукових виданнях, а також обговоренням результатів дослідження на міжнародних

науково-практичних конференціях.

Практичне значення отриманих результатів.

Практична цінність дисертаційних досліджень полягає в отриманні нових експериментальних даних та залежностей, які характеризують небезпеку поширення зовнішньої пожежі і дозволяють якісно переглянути підходи щодо забезпечення ефективного її обмеження поширення при застосуванні відповідних типів протипожежних карнизів для різних функціональних зон будівель.

Результати дисертаційного дослідження можуть бути використаними для удосконалення нормативної бази, а також проєктними установами та експертами у галузі пожежної безпеки об'єктів будівництва.

Результати досліджень стали теоретичною та практичною основою під час розроблення Зміни №1 до ДБН В.1.2-7:2021 «Основні вимоги до будівель і споруд. Пожежна безпека», ДБН В.1.1-7:202X «Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги», а також ДБН В.2.6-33:202X «Конструкції зовнішніх стін із фасадною теплоізоляцією. Вимоги до проектування».

Особистий внесок здобувача полягає в тому, що всі основні результати дисертаційного дослідження автором одержані самостійно та наведені в роботах, що представлені в додатку А. При проведенні дисертаційного дослідження здобувачем в роботі [1] проаналізовано існуючі методи лабораторних вогневих випробувань та сформульовано задачі досліджень. В роботі [2] розроблено методичку експериментальних досліджень, опрацьовано результати та сформульовано висновки. В роботі [3] визначено недоліки існуючих фасадних протипожежних перешкод та сформульовано гіпотезу щодо потенційної можливості удосконалення обмеження зовнішньої пожежі. В роботі [4] створено та обґрунтовано параметри комп'ютерної моделі, а також визначено критерії оцінювання ефективності обмеження поширення пожежі протипожежними карнизами. В роботі [5] сформульовано задачі досліджень та здійснено порівняльний аналіз отриманих результатів, які стали основою для

формулювання висновків. В роботі [6] здійснено обґрунтування впливу наявності систем протипожежного захисту на динаміку та тривалість розвитку пожежі, яка може поширитися із внутрішнього простору приміщення назовні фасаду будівлі.

Апробація матеріалів дисертації. Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідались та обговорювались та отримали схвалення на науково-практичних конференціях: XIX Міжнародна науково-практична конференція молодих вчених, курсантів та студентів (м. Львів, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, 28-29 березня 2024 р.) XIV Всеукраїнська науково-практична конференція з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист» (Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 24-25 жовтня, 2024); V Міжнародна науково-практична конференція «Екологічна безпека в умовах війни» м. Львів, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, 21 листопада 2024 р.); XVI Міжнародна науково-практична конференція «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій» (Черкаси, Національний університет цивільного захисту України, 2 травня 2025 р.); Міжнародна науково-практична конференція «Problems of Emergency Situations» (Черкаси, Національний університет цивільного захисту України, 14 травня 2025 р.).

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 6 наукових праць, з яких 4 статей у виданнях, включених МОН України до переліку фахових, 1 стаття у науковому журналі, що входить до бази даних Scopus та 1 стаття у науковому журналі, що входить до бази даних Web of Science, а також 7 тез доповідей на міжнародних та всеукраїнських науково-практичних конференціях.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з анотації, вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел та 2 додатків. Загальний обсяг дисертації становить 203 сторінок та включає 68 рисунків, 16 таблиць та 127 джерел використаної літератури.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПОЖЕЖ ЩО СУПРОВОДЖУВАЛИСЯ ПОШИРЕННЯМ ВОГНЮ ЗЗОВНІ БУДІВЛІ ТА ЇХ НАСЛІДКИ

В рамках вирішення першого наукового завдання проведено аналіз пожеж, які супроводжувалися зовнішнім поширенням полум'я уздовж фасаду та обґрунтовано напрями підвищення їх ефективності щодо обмеження вертикального поширення вогню. Загалом розділ присвячено аналітичному огляду проблеми вогнестійкості фасадів. На основі статистичних даних обґрунтовано актуальність стримування фасадних пожеж. Шляхом вивчення міжнародного досвіду систематизовано практику застосування протипожежних карнизів і бар'єрів як засобів конструктивного захисту. Аналіз наукових праць дозволив класифікувати небезпеки зовнішнього поширення вогню та визначити напрями для подальших експериментальних досліджень.

1.1. Аналіз статистичних даних про фасадні пожежі

Виникнення по поширення пожеж ззовні будівель та споруд є одним із найнебезпечніших типів пожеж, оскільки вони супроводжуються стрімким поширенням вогню. Як правило, такі пожежі не можуть бути обмежені або локалізовані автоматичними системами протипожежного захисту, якими обладнані внутрішні приміщення будівлі, навіть на початковій стадії їх виникнення. Разом із тим, забезпечення обмеження поширення пожежі ззовні будівлі є однією із основних вимог пожежної безпеки, які висуваються до будівель і споруд, згідно із Законом України «Про надання будівельної продукції на ринку» [1] та державних будівельних норм у сфері пожежної безпеки [2-3].

Сучасні фасадні системи є складним елементом конструкції будівлі і можуть становити однією із з найбільших частин витрат на будівництво, зокрема для висотних будинків, іноді їх вартість складає в межах 20-25% від всієї вартості будівництва [4].

Незважаючи на те, що згідно вимог будівельних норм (відчизняних та зарубіжних) у висотних будинках та будинках підвищеної поверховості під час проектування фасаду слід використовувати лише негорючі матеріали [5-11], сучасні фасадні системи проектуються з використанням горючих компонентів, які можуть значно впливати на процеси швидкого поширення пожежі та сприяти її неконтрольованому розвитку. Горючі компоненти у конструкції фасадних систем, як правило, включає широкий діапазон полімерів, зокрема, таких як поліетилен, полікарбонат, феноли, поліізоціанурат (PIR), поліуретан (PUR) або полістирол тощо [12].

Аналіз наслідків пожеж у житлових та громадських будинках у країнах Європи та США з 2000 по 2024 роки демонструє, що 79% пожеж в середині об'єму будівлі здебільшого поширюється на 1-2 поверхи, 19% пожеж поширювалися на 3-5 поверхів і близько 2% пожежі поширювалися від 6 до 100 поверхів [13-14]. Аналіз наслідків зовнішніх пожеж за аналогічний період у житлових та громадських будинках демонструє, що 69% пожеж поширювалося на 1-2 поверхи, 28% пожеж поширювалося на 3-5 поверхів та 2% пожеж поширювалося від 6-ти до 100 поверхів. При цьому, майже в 5% випадків зовнішніх пожеж, вони поширювалися на покрівлю будівлі [14]. На рисунку 1 наведено зведені інформаційні діаграми.

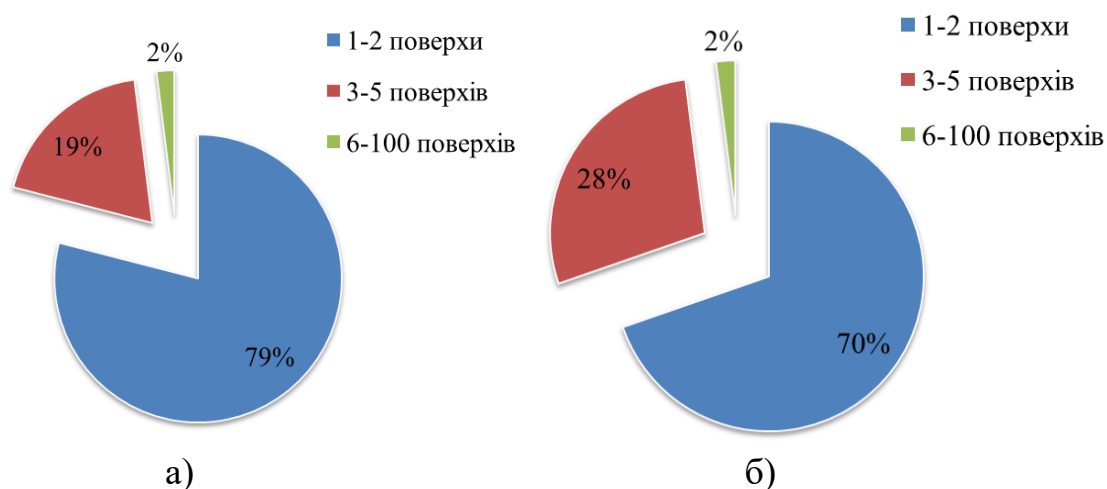


Рисунок 1.1 – Аналіз наслідків поширення пожеж у житлових та громадських будинках у світі з 2000 по 2024 роки, де: а – в середині об'єму споруд; б) ззовні будівлі.

Слід відмітити, що процеси поширення фасадної пожежі залежать від типу конструктивного виконання фасадних систем та можуть призводити не тільки до стрімкого поширення вогню, але і до руйнування самої зовнішньої огорожувальної конструкції, що в свою чергу створює додаткові ризики для пожежно-рятувальних підрозділів, які в цей час можуть ліквідовувати пожежу. На рисунку 2 наведено фото пожежі громадської офісної будівлі Lotus Business Park під час пожежі 2014 року, Мумбаї, Індія, що супроводжувалася руйнуванням світлопрозорої фасадної системи.

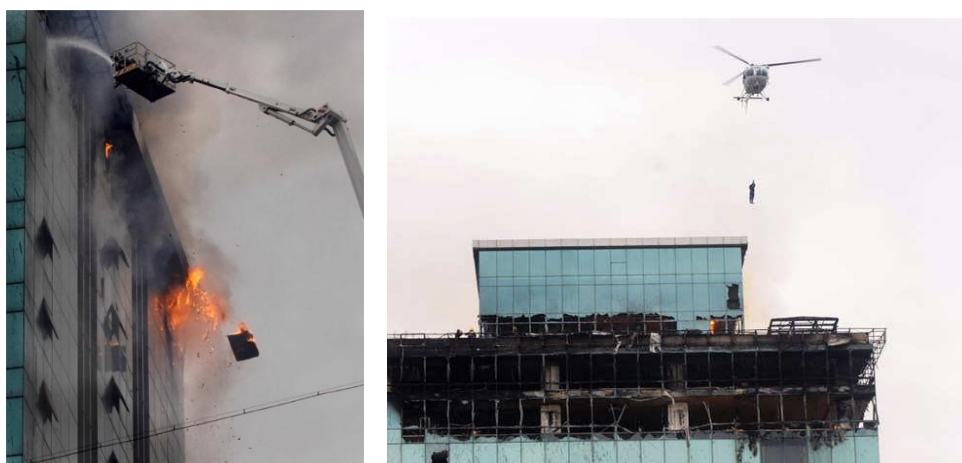


Рисунок 1.2 – Фото руйнування фасадної системи будівлі під час пожежі.

Окрім цього, пожежа може поширюватися не тільки по вертикалі гору, але і горизонтально вздовж периметру фасаду, навіть при наявності складної конструктивної форми фасаду будівлі. Як приклад, 29 серпня 2020 року сталася велика пожежа в місті Мадрид (Іспанія) у висотному 20-ти поверховому будинку. Незважаючи на наявність виступів на фасаді, що за формою можливо прирівняти до протипожежних карнизів, вогонь швидко поширювалася, як по вертикалі на вище розташовані поверхи, так і по горизонталі. Наявність відповідної пожежної техніки та відмінні дії рятувальних підрозділів дозволили ліквідувати вогонь за 2 години, а мешканців вдалося безпечно евакуювати з будинку, проте використання неякісних облицювальних елементів (алюмінієвих панелей) спричинило велику площу ураження будинку та її

покрівлі. На рисунку 2 наведено наслідки пожежі



Рисунок 1.3 – Приклад наслідків фасадної пожежі (Іспанія).

Наступний приклад масштабної фасадної пожежі слід відмітити пожежу, яка фактично повністю знищила 24-х поверховий Grenfell Tower у червні 2017 року, що вважається однією з найгірших сучасних пожежних катастроф у Великобританії. З четвертого поверху квартири вогонь швидко поширився ззовні по фасаду будівлі та перейшов на східну та північну частину будівлі. На рисунку 4 наведено наслідки пожежі та руйнування фасаду для різних сторін будівлі [15].



Рисунок 1.4 – Наслідки поширення пожежі по фасаду в наслідок пожежі у будівлі Grenfell Tower в 2017 (Лондон, Великобританія).

Окремо слід відзначити, що наслідки даної пожежі стали основою для детального аналізу та перегляду вимог будівельних норм, особливо в частині пожежної безпеки фасадних систем та регламенту утримання систем протипожежного захисту, зокрема автоматичного водяного пожежогасіння [16-17]. Також варто відзначити, що аналіз наслідків поширення даної пожежі та конструктивних параметрів фасаду показав, що даний тип фасаду мав, так звані, вертикальні протипожежні бар'єри, які мали б забезпечувати обмеження поширення пожежі по горизонталі. Разом із цим, неякісний облицювальний матеріал, в тому числі, для даних вертикальних протипожежних бар'єрів, став однією із основних причин стрімкого та масштабного поширення пожежі та, як наслідок, призвів до колосальних людських жертв та матеріальних збитків.

Серед прикладів масштабного поширення зовнішньої фасадної пожежі, що супроводжувалася подальшим поширенням вогню на покрівлю будівлі є масштабна пожежа елітному житловому комплексу в Пусані (Південна Корея), де розміщувалося 202 квартири в 2010 році. Пожежа поширилася на 33 поверхи менш ніж за 30 хвилин, та спровокувала глобальний перегляд вимог пожежної безпеки багатоповерхових житлових будинків країни. Причиною пожежі стало займання сміття у сміттевій камері будівлі, що розташовувалась на 4 поверсі близько 11:30 ранку. Вогонь та небезпечні чинники пожежі швидко поширилося через вентиляційні шахти в центральній частині будівлі, де розташовувалась сходові клітка, а також ззовні по фасаду будівлі, при цьому за 20 хвилин вогонь охопив дах вежі. Пожежна служба направила 70 пожежних автомобілів і гелікоптер до будівлі, проте пожежні автодрабини змогли проводити рятувальні роботи лише на рівні до 15-го поверху [18-19]. На рисунку 5 наведено фото будинку та фрагмент пожежі під час її поширення.



Рисунок 1.5 – Фото масштабної фасадної пожежі в житловому комплексі (Південна Корея).

Окрім стрімкого поширення пожежі, небезпека полягала в тому, що вогонь поширився на покрівлю, де куди рятувальники виводили людей для їх евакуації за допомогою гелікоптера. В розслідуванні пожежі відзначається [18-19], що через відсутність будь яких протипожежних фасадних бар'єрів (карнизів), зокрема в зоні покрівлі будівлі, люди які чекали на евакуацію гелікоптером опинилися фактично в епіцентрі пожежі. Лише через оперативність місцевої влади та рятувальних служб, 10 мешканців вдалося евакуювати з покрівлі за допомогою гелікоптера, при цьому сама покрівля фактично повністю вигоріла. Таким чином, влаштування протипожежних бар'єрів та протипожежних карнизів важливо не тільки для обмеження поширення пожежі уздовж фасаду будівлі, але і для поширення вогню на покрівлю будівлі, де може бути облаштована зона безпеки.

Аналіз пожеж, які виникали в середині приміщення та поширювалися вертикально по фасадам будівель демонструє, що наявність горизонтальних конструктивних елементів значно перешкоджає швидкому поширенню пожежі на вище розташовані поверхи будівлі. Такими конструктивними елементами,

окрім протипожежних карнизів, можуть бути звичайні балкони або галереї із шириною площадки 1,0-1,5 м. Спостерігалися окремі випадки, коли для фасаду будівель, який складався із двох частин його конструктивного виконання, а саме вертикальний без виступів та з балконом шириною 1,2 м, поширення пожежі мало різний характер та відповідно наслідки. Зокрема, в 2020 році в Лос Анджелес (США) для випадку будівлі із наявністю балкону спостерігалось обмеження поширення пожежі на вище розташовані поверхи [20]. Для зони фасаду без виступів, пожежа поширилась на вище розташований поверх, зокрема через руйнування вікна (на фото виділено червоним кольором). На фото рисунку 6 наведено приклад описаної пожежі та наслідки.

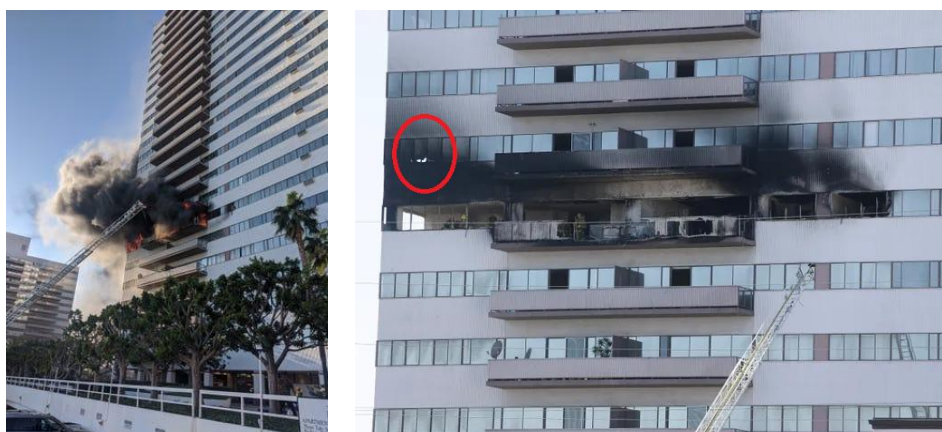


Рисунок 1.6 – Фото пожежі у будівлі, що має у складі фасаду виносні балкони.

Серед фасадних пожеж в Україні, варто відмітити пожежу у висотній житловій будівлі в місті Києві, яка відбулася 28 жовтня 2024 року у 33-х поверховій будівлі. Особливість даної будівлі полягає в тому, що пожежа відбулася на 14 поверсі в зоні розміщення протипожежного карнизу із шириною 0,75 м, який розміщено по периметру будівлі на межі вертикальних протипожежних відсіків. В результаті виникнення пожежі в середині квартири, вона поширилася на 80 м², при цьому системи протипожежного захисту будинку не спрацювали, що стало причиною її швидкого поширення. На рисунку 1.7 наведено фото будівлі під час виникнення описаної пожежі.



Рисунок 1.7 – Фото пожежі у будівлі Jack House, Київ.

Ліквідація пожежі тривала більше півтори години, при цьому через знаходження системи внутрішнього протипожежного водопроводу не в працездатному стані, пожежно-рятувальним підрозділам довелося прокласти рукавну лінію для подачі води вручну через незадимлювану сходову клітку, по якій одночасно відбувалася евакуація людей [21]. Лише злагодженість роботи пожежних підрозділів та наявність ефективної та сучасної протипожежної техніки, із потужним насосним обладнанням, дозволило уникнути людських жертв та мінімізувати потенційні збитки.

Важливим аспектом даної пожежі є те, що наявність протипожежного карнизу забезпечила ефективне обмеження поширення пожежі на вище розташовані поверхи, а наявність фасаду із негорючим облицюванням забезпечило відсутність її розвитку та, як наслідок, відсутність руйнування фасадної системи і зменшило ризики під час роботи пожежо-рятувальних підрозділів. На рисунку 1.8 наведено фото будівлі після ліквідації пожежі та фото протипожежного карнизу, що забезпечив обмеження поширення пожежі на верхні поверхи.



Рисунок 1.8 – Фото будівлі після ліквідації пожежі.

Доцільно відзначити, що протипожежний карниз, який застосовувався для даної будівлі був не простої прямокутної форми, а мав форму ламаного трикутника, що могло вплинути на процеси поширення пожежі та знизити турбулентність теплового потоку від пожежі, відводячи її небезпечні чинники у простір від зони площини фасаду.

Серед одного із видів фасадних протипожежних перешкод варто відмітити застосування протипожежних карнизів для покрівлі будівель та споруд. Як правило, такі карнизи притаманні для громадських висотних будинків із експлуатованою покрівлею, яка використовується як зона відпочинку або навпаки – зона розміщення технологічного (інженерного) обладнання, зокрема: котельні, теплових станцій, резервних електрогенераторів, сонячних панелей, резервуарів протипожежного запасу води тощо. На рисунку 1.9 наведено приклад таких протипожежних карнизів та будівлю, в якій вони забезпечили не поширення пожежі на покрівлю.



Рисунок 1.9 – Фото будівлі із протипожежним карнизом для захисту експлуатованої покрівлі.

Варто відзначити, що окрім протипожежних карнизів для захисту експлуатованої покрівлі будинків також можливо використовувати простінок (спандрел) певної висоти з нормованим класом вогнестійкості, який забезпечить обмеження поширення пожежі на покрівлю та відведе вогонь і тепловий потік у простір. В даному випадку форма фасадної протипожежної перешкоди та її висота в значній мірі впливає на ефективність запобігання поширення пожежі.

Узагальнення аналізу пожеж та їх наслідків демонструє наступні сценарії поширення пожежі, які можливо запобігти, використовуючи ефективні фасадні протипожежні карнизи та бар'єри певної форми:

- поширення пожежі між поверхами та вертикальними протипожежними відсіками
- поширення пожежі між приміщеннями по горизонталі;
- поширення пожежі із стилобатної частини будівлі на її висотну частину;
- поширення пожежі на покрівлю (похилу чи плоску), в тому числі експлуатовану.

Визначення найбільш ефективної форми протипожежних карнизів для захисту різних частин будови споруди дозволить підвищити ефективність запобігання поширення пожежі ззовні будівель та удосконалити підходи щодо впровадження параметричного методу у будівництві під час оцінки поширення

пожежі зовнішніми огорожувальними конструкціями будівель різного функціонального призначення [22-23].

1.2. Аналіз досвіду застосування протипожежних карнизів та протипожежних вертикальних бар'єрів в різних країнах

Протипожежні карнизи широко застосовуються у будівництві в багатьох країнах світу, починаючи з кінця 70-х років і по сьогоднішній день [24-27]. Як правило, протипожежні карнизи використовують для забезпечення обмеження поширення пожежі ззовні, по фасаду будівлі для наступних випадків:

- обмеження поширення пожежі ззовні по фасаду між вертикальними протипожежними відсіками;
- обмеження поширення пожежі на експлуатовану покрівлю будівлі;
- обмеження поширення пожежі зі стилобату будівлі на її висотну частину.

В окремих випадках протипожежні карнизи можуть використовувати, як компенсуючий протипожежний захід, зокрема для випадків застосування горючих облицювальних чи матеріалів для утеплення фасаду, що входять до конструкції фасадних систем. На рисунку 8 наведено приклади протипожежних карнизів, які захищають перелічені зони фасаду будівель.

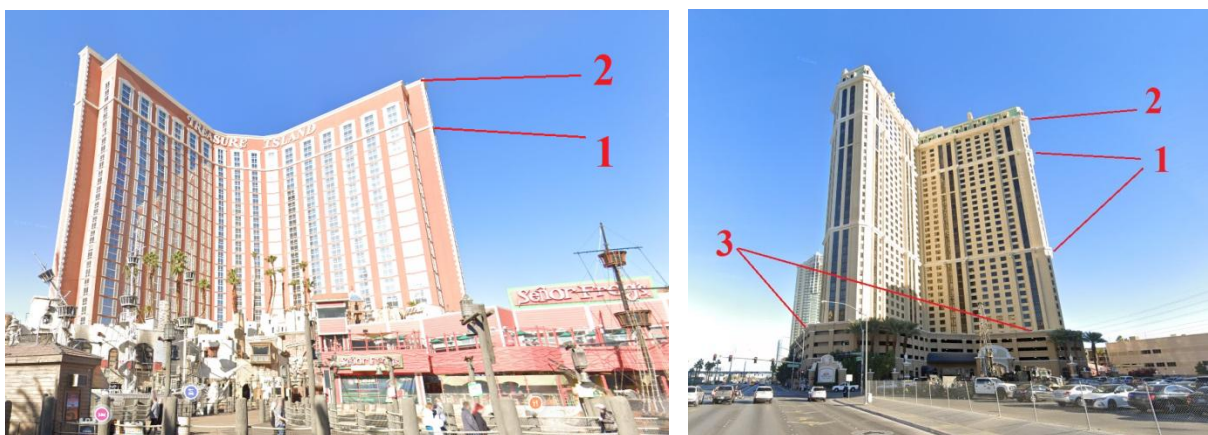


Рисунок 1.10 – Приклади застосування протипожежних карнизів, де: 1 – протипожежний карниз встановлений на межі протипожежних відсіків; 2 – протипожежний карниз для захисту покрівлі будівлі; 3 – протипожежний карниз для захисту стилобату будівлі.

Разом із цим, на сьогоднішній день відсутні систематизовані дані щодо досвіду застосування протипожежних карнизів різних типів для захисту різних зон будівель у різних країнах. Таким чином, постало питання провести аналіз існуючих типів протипожежних карнизів, їх основних конструктивних параметрів та способів застосування у різних країнах світу, для виявлення шляхів удосконалення процесу обмеження поширення зовнішньої пожежі.

В Швеції, Правила пожежної безпеки та зокрема розділ 5:553 BFS 2011:26, розділ BBR 19 [28] визначають, що одним із засобів досягнення обмеження зовнішнього поширення пожежі є обмеження площі вікон, або встановлення віконних міжповерхових простінків висотою не менше 1,2 м. В разі відсутності таких простінків, а саме коли фасад виконаний із панорамним типом вікон, такі вікна повинні бути вогнетривкими, з класом вогнестійкості не менше E 30. Також описуються випадки коли конструкція вікна складається із двох шарів (склопакетів). Для таких випадків допускається передбачати вогнестійкість кожної частини (шару) вікна не менше E 15.

Разом із цим, науковий пошук обґрунтування висоти віконного міжповерхового простінку в національних нормах відсутній, а в роботі [29] говориться про те, що дані параметри в більшій мірі більше пов'язані з традиціями будівництва, а не параметрами безпеки.

Окрім зазначеного, дані будівельні вимоги встановлюють вимоги до протипожежних карнизів, що встановлюються на фасаді будівлі на межі протипожежних відсіків та повинні бути шириною не менше 0,5 м. В національних вимогах Швеції відсутні вимоги щодо обґрунтування даної ширини карнизу, проте передбачено можливість застосування його альтернативної конструктивної форми (окрім прямого виступу). Підтвердження забезпечення обмеження поширення пожежі при застосування протипожежних карнизів іншої форми має здійснюватися згідно з методикою стандарту SP Fire 105 [30].

У Фінляндії немає встановлених вимог у чинних будівельних нормах

щодо параметрів фасадних протипожежних перешкод у вигляді бар'єрів для обмеження поширення пожежі між вертикальними протипожежними відсіками. Разом із цим, значенні висоти віконного міжповерхового простінку має становити не менше 1 м для житлових будинків [31]. Для громадських будинків передбачається встановлення протипожежних карнизів із шириною не менше 0,3 м, але тільки для випадків застосування горючих або важко горючих матеріалів в конструкції фасадних систем будівель. Тобто, застосування протипожежних карнизів є уточнюючою вимогою для можливості застосування певних типів облицювальних матеріалів у фасадах будівель.

Будівельні норми Норвегії більш суворо підходять до конструктивних вимог щодо забезпечення обмеження поширення пожежі. Зокрема в нормах [32] визначено, що мінімальна висота віконних міжповерхових простінків має становити не менше ніж 1,2 м або слід влаштовувати протипожежні карнизи з аналогічною шириною (не менше 1,2 м), при цьому додаткових вимог, щодо їх форми або альтернативного конструктивного виконання не передбачено [33].

Незважаючи на досить вичерпні будівельні вимоги, щодо захисту фасаду, національні вимоги Норвегії, щодо параметрів протипожежних карнизів для захисту покрівлі або стилобатної частини будівлі відсутні, так само як у Фінляндії та Швеції.

Будівельні вимоги Китаю в частині пожежної безпеки [34-36] передбачають досить жорсткі вимоги в частині забезпечення обмеження поширення пожежі по фасадам будівель. Для житлових та громадських будівель визначено мінімальну висоту міжповерхового віконного простінку не менше 0,9 м для будівель певного ступеню вогнестійкості та умовної висоти. Що стосується протипожежних карнизів, то дані норми визначають їх мінімальну ширину не менше 0,5 м незалежно від призначення (захисту фасаду, покрівлі чи стилобату). Разом із цим, будівельні норми Китаю не передбачають оцінювання ефективності фасадних протипожежних для різних типів фасадів в залежності від їх конструктивних параметрів.

Вимоги будівельного кодексу Португалії [37-38] та Іспанії передбачають нормативне регулювання питання забезпечення обмеження поширення пожежі між поверхами, шляхом застосування віконних міжповерхових простінків, балконів з виступом та протипожежного карнизу. Для віконних міжповерхових простінків мінімальна висота визначена в 1,1 м, а для протипожежного карнизу та балконів, ширина їх виступу повинна складати не менше 1 м. При цьому, будівельні норми Португалії визначають, що конструкція виступу балкону або протипожежного карнизу повинна мати значення класу вогнестійкості не менше ніж EI 60. Разом із цим, слід відзначити, що дані щодо параметрів протипожежних карнизів для захисту покрівлі або стилобатної частини будівлі в даному кодексі не приведено.

В Австралії в першому томі будівельного кодексу [39], що призначений для житлових, громадських та адміністративних будівель встановлює вимоги до конструктивних параметрів фасадних протипожежних перешкод, а саме для віконних міжповерхових простінків та протипожежного карнизу. Окремо слід відмітити, що окрім висоти віконного міжповерхового простінку від верхнього краю нижнього вікна до нижнього краю верхнього вікна (має становити не менше 0,9 м), норми регламентують мінімальну відстань від рівня підлоги до нижнього краю вікна (не менше 0,6 м). При цьому, незалежно від умовної висоти будівлі та ступеню її вогнестійкості фасад слід виконувати із використанням негорючих матеріалів. Значення ширини протипожежного карнизу має становити не менше 1,1 м. На рисунку 1.11 наведено схему влаштування фасадних протипожежних перешкод.

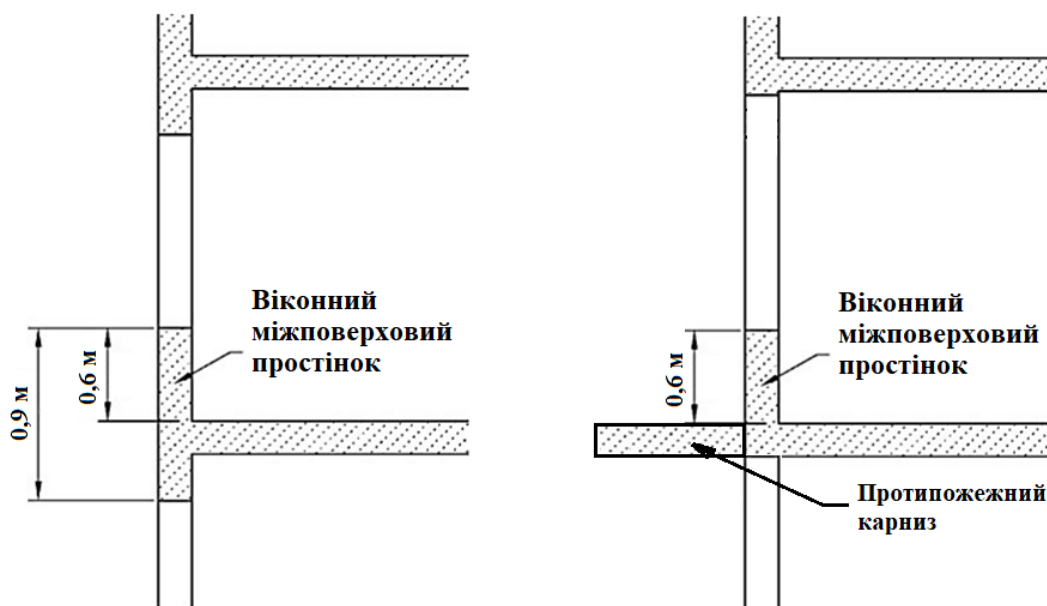


Рисунок 1.11 – Схема влаштування фасадних протипожежних перешкод згідно з вимогами [39].

США стали лідером у будівництві хмарочосів ще наприкінці 19 століття та продовжують зберігати лідерство до сьогоднішнього дня. Архітектурний прогрес і висока конкуренція між будівельними компаніями спонукали будувати все вищі будинки із використанням інноваційних технологій, як для будинків із монолітного бетону так і з застосуванням сталевих конструкцій.

Базовим документом у сфері пожежної безпеки об'єктів будівництва є NFPA 1: Fire Code 2021 [40-41], що розроблений Національною асоціацією протипожежного захисту (National Fire Protection Association, NFPA), який встановлює стандарти та правила для забезпечення пожежної безпеки в будівлях, спорудах і об'єктах різного функціонального призначення. Цей будівельний кодекс є одним із основних нормативних документів, що встановлюють вимоги до пожежної безпеки в США та багатьох інших країнах.

Дані вимоги визначають, що світлові прорізи (вікна) слід відокремлювати як по горизонталі так і по вертикалі, а мінімальна горизонтальна відстань між краями має становити не менше 1,524 м. Значення висоти віконного міжповерхового простінку має становити 0,92 м. Якщо дані вимоги не

виконуються, то заповнення вікон та світлових прорізів повинно бути протипожежним із межею вогнестійкості не менше 0,75 хвилин.

Для випадків застосування протипожежних карнизів, їх ширина має бути не менше 0,76 м. при цьому вони застосовуються як для фасаду будівлі так і для її покрівлі. Щодо стилобатної частини будівлі, то діючі норми США не передбачають додаткових заходів щодо їх захисту. Дані вимоги можливо не застосовувати, якщо будівля обладнана системою автоматичного водяного пожежогасіння або кількість поверхів у будівлі не перевищує 3 поверхи. Також, дана вимога не стосується багато поверхових паркінгів та гаражів обладнаних системами пожежогасіння.

У Франції концепція встановлення вимог, щодо забезпечення обмеження поширення пожежі по фасадам будівель є подібною до будівельного законодавства України, та встановлюється окремо до залежно від типу будівлі за функціональним призначенням та її умовної висоти.

Основним законодавчим документом є Кодекс будівництва та житла Франції [42], а також ряд стандартів і технічних регламентів, які стосуються пожежної безпеки будівель та споруд різного функціонального призначення. Франція має досить широкий спектр вимог до забезпечення обмеження поширення пожежі, як в частині застосування віконних міжповерхових простінків, так і протипожежних карнизів горизонтального та вертикального типу.

Значення висоти віконних міжповерхових простінків залежить від значення пожежної навантаги в середині приміщення і для навантаження більше 130 МДж/м^2 має становити не менше 1,3 м. Якщо значення пожежної навантаги становить менше 80 МДж/м^2 та висота віконних міжповерхових простінків має становити не менше 0,8 м, якщо 25 МДж/м^2 та висота віконних міжповерхових простінків має становити не менше 0,6 м.

В нормах визначено, що дана відстань може бути забезпечена, як сума відстані між вікнами та довжиною горизонтальної проекції протипожежного

карнизу, який застосовуються як додатковий захід. Загалом, ширина протипожежного карнизу рекомендується робити в межах 0,6-1,3 м.

В Новій Зеландії, вимоги щодо застосування протипожежних карнизів та протипожежних бар'єрів різних типів є фактично аналогічним як і у Франції, проте максимальна ширина протипожежного карнизу визначається у 1,5 м. [43-44]. Разом із цим, на відміну від будівельних норм Франції, у Новій Зеландії не встановлюються вимоги щодо забезпечення вогнестійкості фасадних протипожежних перешкод. Серед недоліків приведених норм, приведені параметри протипожежних карнизів та протипожежних бар'єрів для захисту покрівлі або стилобатної частини будівлі в даному кодексі не застосовуються.

В таблиці 1 наведено зведені дані щодо параметрів фасадних протипожежних перешкод у різних країнах світу.

Таблиця 1.1 – Дані, щодо параметрів до протипожежних карнизів та міжповерхових віконних простінків в окремих країнах

Країна	Протипожежний карниз із шириною, м	Міжповерховий віконний простінок із висотою, м
Україна	0,75	0,3 - 1,4
Австралія	1,1	0,9
Фінляндія	0,3	1,0
Франція	0,6 - 1,3	0,6 - 1,3
Китай	0,5	0,9
Нова Зеландія	0,6	1,5
Норвегія	1,2	1,2
Португалія	1,1	1,1
Іспанія	1,0	1,0
Швеція	0,5	1,2
США	0,76	0,92

Таким чином, за результатом аналізу нормативної будівельної бази окремих країн в частині застосування фасадних протипожежних перешкод визначено, що найбільш поширеним є застосування протипожежних карнизів та віконних міжповерхових простінків для захисту фасаду від поширенням пожежі ззовні уздовж фасаду між вертикальними протипожежними відсіками. Разом із цим, на сьогоднішній день відсутні дані та обґрунтування щодо

підвищення ефективності запобігання поширення пожежі ззовні будівель протипожежними карнизами для їх різних конструктивних частин, а саме стилобатної частини та покрівлі будівлі. Визначення даних параметрів дозволить ефективно застосовувати фасадні протипожежні перешкоди різних конструктивних типів для будівель та споруд із складною конструктивною системою, а також систематизувати ефективність їх застосування.

1.3. Аналіз наукових досліджень зовнішнього поширення пожежі та систематизація потенційних небезпек під час їх поширення

Дослідження процесів поширення зовнішньої пожежі та виявлення закономірностей, які впливають на її ефективне обмеження є одним із пріоритетних питань забезпечення пожежної безпеки будівель та споруд. Значна кількість дослідників присвятили свої наукові роботи для розв'язання даної проблеми задля збереження здоров'я, життя, майна та довкілля, зважаючи на сталий та постійний розвиток галузі будівництва. Попередній аналіз наукових робіт демонструє, що основними напрямками забезпечення обмеження поширення пожеж, а також їх ліквідації на початковій стадії їх виникнення є [45-46]:

- удосконалення систем протипожежного захисту та систем автоматичного пожежогасіння;
- дослідження умов безпечного використання будівельних матеріалів, в тому числі облицювальних, із різними показниками пожежної небезпеки (горючість, здатність поширювати полум'я, температура займання тощо);
- вплив архітектурних та геометричних параметрів фасадів будівель на процеси поширення пожежі;
- застосування вогнестійких заповнень світлових прорізів;
- використання протипожежних фасадних перешкод (протипожежних карнизів, бар'єрів, поясів, штор тощо) для обмеження потенційної зони можливої пожежі.

Окремим питанням наукових досліджень пожежної безпеки фасадів будівель є визначення правильних та найбільш ймовірних сценаріїв пожежі під час проведення математичних розрахунків, імітаційних натурних вогневих досліджень та комп'ютерного моделювання [47].

Дослідження представлені в роботі [48] відзначають, що процеси вертикального поширення вогню по зовнішній стороні фасаду є одним із найскладніших видів поширення пожежі, який залежить від багатьох чинників, які часто важко поєднати між собою. Окрім цього, архітектурна складова вузлів фасадних систем, ще більше ускладнює потенційну оцінку наслідків від пожежної небезпеки. Також відзначається, що сучасні тенденції в будівництві в частині скорочення використання енергій та збереження тепла призвели до збільшення використання горючих ізоляційних матеріалів та матеріалів утеплення фасаду. Як приклад, полістирол та пінопласт один з перших синтетичних полімерів, який масово використовується для теплоізоляції будівель. Він має чудові адгезійні властивості, високу хімічну стабільність та невисоку собівартість виробництва та монтажу. Разом із тим, використання неякісних утеплювачів на його основі стали однією із основних причин стрімкого поширення фасадних пожеж у висотних будівлях та призвели в ряді випадків до масштабних втрат, а інколи і до загибелі людей.

В роботі [49] представлено критичний огляд чинних будівельних стандартів та будівельних норм, які стосуються інтеграції енергоефективних систем в структуру фасадних конструкцій. Аналіз проектів демонструє, що, як приклад інтегровані фотоелектричні системи (BIPV) призначені для функції збору сонячної енергії, значно збільшують пожежне навантаження в конструкції фасадів і тільки за 2012-2013 роки призвели до 430 пожеж у будівлях в Німеччині. Окрім цього, пожежі таких сонячних модулів можуть мати непередбачуваний розвиток та поширення, оскільки фотоелектричні модулі можуть небезпечно реагувати на воду подану на гасіння пожежі, спричинити ураження електричним струмом та супроводжуватися викидом

токсичних газів. При цьому, сама наявність панелей на поверхні фасаду негативно впливає на забезпечення доступу для пожежно-рятувальних підрозділів до внутрішніх шарів конструкції фасадних систем та ускладнює процес гасіння.

В роботах [50-52] досліджуються проблеми використання нових видів оздоблювальних матеріалів та недосконалості окремих технологій будівництва, зокрема при використанні світлопрозорих конструкцій для заповнення світлових прорізів великих розмірів. Однією із проблем є застосування металевих матеріалів кріплення, які мають крихку структуру та легко деформуються при невисоких температурах або при різкій зміні їх діапазону. Як приклад, алюмінієві панелі кріплення таких скло прозорих конструкцій під час пожежі вже при температурі в 350 °С можуть легко деформуватися і в подальшому повністю руйнуватися під значною вагою скляних панелей. Руйнування таких конструкцій є не просто небезпечним і може призвести до прогресивного руйнування конструкції фасаду, але і створює загрозу для людей, які евакуюються з будівлі та для пожежно-рятувальних підрозділів, які проводять рятувальні роботи. Аналогічна проблема стосується кріпильних елементів (болтів, ригелів, монтажних пластин), які під час проведення сертифікаційних вогневих випробувань не знаходяться в напруженому стані, а відповідно прогнозувати їх міцність та вогнестійкість під час пожежі фактично не можливо. В даному випадку автори пропонують удосконалити методичні підходи під час проведення сертифікаційних випробувань конструкцій фасадів.

Окремим питанням є аналіз та удосконалення методичних підходів та випробувального обладнання для оцінки пожежної безпеки фасадів, що висвітлено в роботі [53-57]. Провідними науковими організаціями Європи були неодноразово зроблено кілька спроб розробити єдиний європейський гармонізований метод перевірки та оцінки пожежної безпеки фасадів та матеріалів їх облицювання. Наукова конференція та створення робочої групи із п'яти країн (Швеції, Великої Британії, Франції, Німеччини та Угорщини)

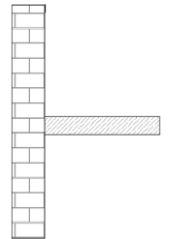
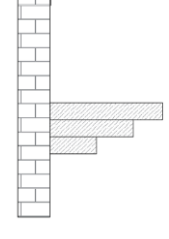
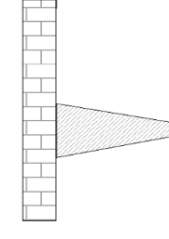
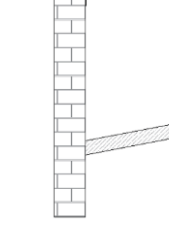
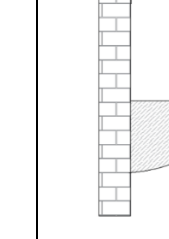
подали заявку на тендер та отримали контракт на розробку першого єдиного європейського підходу до оцінки пожежної безпеки фасадів будівель та споруд різного функціонального призначення. У науковому проекті брали участь 24 субпідрядники та 14 зацікавлених сторін, які в майбутньому мали користуватися новим розробленим методом. Мета проекту полягала в тому, щоб задовольнити запит комітету з будівництва (SCC) та надати регуляторам держав-членів ЄС засоби для регулювання протипожежних характеристик фасадних систем на основі європейського підходу, погодженого SCC для уникнення конфліктних ситуацій та численних судових позовів. Початкові етапи цього проекту були зосереджені на створенні реєстру чинних нормативних вимог у всіх державах-членах щодо протипожежних вимог до фасадних систем, а також на визначенні ті держави, які мають нормативні вимоги з національними уточненнями, що виходять за межі поточних систем класифікації EN 13501 «Пожежна класифікація будівельних виробів і будівельних конструкцій. Частина 1. Класифікація за результатами випробувань щодо реакції на вогонь, а також зіставлення деталей цих додаткових вимог» [58-59]. Після визначення переліку критеріїв та нормативних потреб була розроблена методологія тестування та класифікації на основі BS 8414 та DIN 4102-20 для вирішення визначених ключових характеристик та класифікаційних характеристик матеріалів фасадів.

Нажаль, фактичні результати робочих зустрічей і семінарів на цю тему, які проводилися в Європі протягом останніх 10 років, свідчать про те, що найскладнішою і важливою частиною завдання є визначення системи класифікації пожежної безпеки фасадних систем, прийнятної для всіх держав-членів, враховуючи їх національні правила та відповідаючі вимогам Регламенту будівельних виробів (CPR). Ідея нової методології полягала в тому, що система класифікації має бути прозорою та бути в рамках існуючих національних нормативних актів, а також має бути максимально простою, наприклад, використовуючи мінімальну кількість класів, необхідних для того,

щоб держави-члени могли ефективно підтримувати необхідні рівні безпеки. Було також визначено, що метод оцінки має бути застосовним до широкого спектру фасадних систем, доступних на ринку, включаючи засклені фасади, зелені фасади та інші новітні технології. Разом із цим, за результатом роботи і досі не створено єдиних методичних підходів щодо оцінки можливості поширення пожежі по фасадам будівель. При цьому, критерії, температурний режим випробувань, випробувальне обладнання, масштаби зразків та випробувальних стендів досі значно відрізняються і не мають єдиної системи оцінки пожежної небезпеки фасадних систем. Окремим питанням також залишається початковий сценарій пожежі під час проведення сертифікаційних досліджень, а саме не прийнято єдиного підходу щодо місця його первинного виникнення, а також щодо класу пожежі, яка його відтворює.

Подібна ситуація залишається із систематизацією та приведенням до єдиних підходів вимог, які висуваються до проектування протипожежних карнизів. В роботах [60-63] детально розкриваються проблеми застосування фасадних протипожежних перешкод різних типів, а також наведено оцінку їх впливу на процеси обмеження поширення зовнішньої пожежі. Разом із цим, на сьогоднішній день в світі відсутні єдині критерії, які характеризують небезпеку можливості поширення зовнішньої пожежі вертикально вгору по фасаді, відповідне випробувальне обладнання та нормативно-технічне регулювання випадків їх застосування, з врахуванням параметричного методу будівництва. При цьому слід розуміти, що конструктивні параметри протипожежних карнизів, зокрема форма їх виступу, може значно впливати на ефективність захисту різних функціональних зон будівлі, з врахуванням конструктивного та архітектурного виконання фасадних систем. В роботі [64] узагальнено основні типи протипожежних карнизів, які найчастіше застосовуються в будівництві для забезпечення вимоги щодо обмеження поширення пожежі ззовні фасадів будівель та споруд. В таблиці 1.2 наведено їх зовнішній вигляд та опис, з врахуванням форми їх виступу за площину фасаду.

Таблиця 1.2 – Досліджувані типи протипожежних карнизів

Протипожежний карниз з прямою формою	Протипожежний карниз з формою багатогранника	Протипожежний карниз з формою гострої трапеції	Протипожежний карниз з формою «вінглету»	Протипожежний карниз з заокругленою формою виступу
				

Враховуючи, що на сьогоднішній день відсутні вимоги щодо єдиної нормативної ширини виступу протипожежного карнизу за площину фасаду, та з врахуванням попереднього аналізу нормативних документів окремих країн наведеного в таблиці 1.1 цього розділу, під час дослідження впливу форми протипожежного карнизу на ефективність обмеження поширення пожежі ззовні будівлі доцільно використовувати ширину карнизу від мінімальної 0,3 м до максимальної 1,5 м, для охоплення максимального спектру експериментальних даних. Отримані експериментальні дані дозволять виявити закономірності впливу параметрів протипожежних карнизів на запобігання поширення пожежі ззовні будівлі на вище розташовані поверхи та її покрівлю, як наукове підґрунтя для удосконалення вимог пожежної безпеки до будівель та споруд. Також отримані закономірності дозволять створити передумови для ефективного запобігання поширення пожежі ззовні будівлі на вище розташовані поверхи для захисту життя та здоров'я людей та для зменшення потенційних збитків від пожежі. Окрім цього, дослідження та встановлення основних показників ефективності протипожежних карнизів різних типів може допомогти виявити можливі негативні впливи, які можуть виникати при застосування протипожежних карнизів певних форм та ширини їх виступу.

Таким чином, дослідження та розкриття закономірностей впливу конструктивних параметрів протипожежних карнизів на процеси запобігання поширення пожежі ззовні будівлі на вище розташовані поверхи та

функціональні частини будівлі є актуальною науковою задачею.

1.4. Висновки до розділу

1. За результатом проведеного аналізу фасадних пожеж у світі та в Україні визначено, що наявність фасадних протипожежних перешкод є ефективним протипожежним заходом щодо забезпечення вертикального поширення зовнішньої пожежі, проте недосконалість конструктивних параметрів фасадних протипожежних перешкод в окремих випадках не забезпечувало запобігання поширення зовнішньої пожежі на вищі поверхи.

2. Встановлено, що на сьогоднішній день сучасні методи дослідження пожежної небезпеки фасадних систем та програми-методики оцінювання забезпечення обмеження поширення зовнішньої пожежі ґрунтуються на розпорядчому методі нормування в будівництві та не включають можливість оцінювання відносної ефективності фасадної протипожежної перешкоди в залежності від її конструктивних параметрів та форми виступу протипожежного карнизу за площину фасаду.

3. Аналіз наукових досліджень у галузі пожежної безпеки фасадних систем демонструє, що існуючі підходи щодо забезпечення пожежної безпеки будівель та споруд від зовнішнього поширення пожежі не враховує, те що конструктивні параметри протипожежних карнизів, зокрема форма їх виступу, може значно впливати на ефективність захисту різних функціональних зон будівлі, з врахуванням конструктивного та архітектурного виконання фасадних систем.

4. Існуюча система критеріїв небезпеки поширення зовнішньої пожежі по фасаду не має єдиних підходів щодо показників небезпеки поширення зовнішньої пожежі вертикально вгору по фасаду, в тому числі з врахуванням можливості застосування параметричного методу будівництва фасадних протипожежних перешкод. При цьому, не враховано що конструктивні параметри протипожежних карнизів, зокрема форма їх виступу, може значно впливати на ефективність

захисту різних функціональних зон будівлі, з врахуванням конструктивного та архітектурного виконання фасадних систем.

5. Виявлення залежностей, які впливають на траєкторію поширення полум'я ззовні фасаду, його вертикальну проекцію вздовж фасаду та температурний вплив на зовнішні стіни і їх світлове заповнення, в залежності від конструктивних параметрів фасадних протипожежних перешкод, є одним із ключових аспектів можливості прогнозування ефективного обмеження поширення зовнішньої пожежі для різних функціональних зон фасаду будівель та споруд.

РОЗДІЛ 2. ТЕОРІЯ ПРОЦЕСІВ ПОШИРЕННЯ ЗОВНІШНЬОЇ ПОЖЕЖІ ТА ПРИНЦИПИ ЇЇ ОБМЕЖЕННЯ

У розділі представлено теоретичне обґрунтування процесів вогневого впливу на фасадні конструкції. Розроблено математичну модель горіння фасадних систем, що дозволила врахувати конструктивні параметри протипожежних карнизів для дослідження умов досягнення точки балансу тиску і швидкості теплового потоку та уникнення утворення точки повторного приєднання полум'я до фасаду. Її використання уможливило встановити закономірності траєкторії виходу полум'я крізь світлові прорізи. За допомогою числових алгоритмів газо-гідродинамічного моделювання відтворено динаміку розвитку пожежі, а моделювання процесів обтікання тіл газовим потоком дало змогу оцінити характер взаємодії полум'я з протипожежними перешкодами.

2.1. Математичні моделі траєкторії поширення полум'я крізь світлові прорізи

В основі виникнення зовнішньої пожежі в будівлях закладається підхід, що в більшості випадків її осередок виникає в середині об'єму приміщення, з подальшим поширенням полум'я крізь світловий проріз, заповнення якого зруйнувалося в результаті високої температури. При цьому, значення температури руйнування конструкції заповнення світлового прорізу залежить від фізичних характеристик матеріалів з яких виготовлено заповнення [65].

Разом із тим, питання вогнестійкості заповнення світлових прорізів у зовнішніх огорожувальних конструкціях є окремим аспектом, суть якого зводиться до забезпечення тої чи іншої межі вогнестійкості конструкції, після завершення якої, пожежа в разі не забезпечення її припинення розвитку (гасіння) пошириться на зовнішню частину огорожувальної конструкції споруди. Таким чином, найгіршим сценарієм розвитку зовнішньої пожежі та її поширення вверх уздовж фасаду є вільне її поширення крізь віконний отвір тої

чи іншої форми. Даний сценарій пожежі детально описаний в роботах [66-67] та має назву «ефект стіни над полум'ям».

В основі даних досліджень лежать математичні моделі характеру траєкторії полум'я, що виходить з віконного отвору для можливості прогнозування поширення пожежі на верхні поверхи будівлі. Згідно з дослідженнями [66], проведено моделювання та математично описано наступні траєкторії поширення полум'я:

- полум'я поширюється вертикально уздовж фасаду (паралельно фасаду);
- полум'я на початковому етапі поширення має відрив від стіни, з подальшим повторним приєднання полум'я до фасаду;
- полум'я має відрив від стіни із збереженням певного відриву у продовж всього процесу розвитку пожежі.

В основі ідеї застосування фасадних протипожежних перешкод лежить мета забезпечити третій тип траєкторії поширення полум'я та не допустити повторного його приєднання до фасаду. В якості критичної умови виникнення ефекту повторного приєднання полум'я до фасаду є співвідношення потужності пожежі включаючи градієнт тиску, ширини отвору та ширини стіни отвору, з якого полум'я виходить назовні.

Одна із математичних моделей, яка описує залежність поширення полум'я крізь отвір та дозволяє прогнозувати його траєкторію в залежності від параметрів вікна є модель запропонована Уокоі [68]:

$$\frac{z}{H - Z_N} = \frac{1}{9\beta T_\infty} \left\{ \left(\frac{x + x_0}{H - Z_N} \right)^{3/2} - \left(\frac{x_0}{H - Z_N} \right)^{3/2} \right\}^2 \bigg/ \left(\frac{x_0}{H - Z_N} \right), \quad (2.1)$$

де: x – відстань від стіни; z – висота полум'я осередку пожежі; x_0 – товщина стіни вікна, з якого виходить полум'я; H – висота отвору вікна; Z_N – висота площини стіни; β – коефіцієнт теплового розширення.

Модель описує конфігурацію траєкторії за допомогою кубічної функції, в

якій потік на першому етапі викидається в горизонтальному напрямку, а потім набирає вертикальний імпульс через силу виділення теплового потоку. Даний випадок є справедливим для сценарію пожежі, коли облицювання зовнішньої стіни є негорючим.

Що стосується траєкторії поширення полум'я із віконного отвору, то в даному випадку доцільно використовувати підхід, який полягає в апроксимації кривої полум'я за допомогою чотирьох ламаних ліній (відрізків), які змінюються за рахунок зміни тиску Δp [68]:

$$\Delta p \sim \frac{1}{2} \rho_{\infty} (\alpha u_m)^2 \cdot \left[\frac{1}{1 + (2x/B)^2} \right], \quad (2.2)$$

де: B – горизонтальна ширина отвору (м); u_m – швидкість потоку уздовж траєкторії; ρ_{∞} – щільність газу навколишнього середовища.

При цьому, слід враховувати, що в будь-якому випадку поширення пожежі крізь вікно, тиск буде зменшуватися за висотою ($\Delta p \rightarrow 0$). Таким чином, траєкторію поширення полум'я можливо виразити наступною залежністю:

$$\frac{x}{L_E} = \begin{cases} c_{n+2} \left(\frac{z}{H_A} \right)^{n+2} + c_{n+1} \left(\frac{z}{H_A} \right)^{n+1} + c_n \left(\frac{z}{H_A} \right)^n + c_0 & (0 \leq z \leq H_A) \\ 0 & (H_A \leq z) \end{cases}, \quad (2.3)$$

де: L_E – значення відстані між центром лінії траєкторії середини полум'я та поверхнею стіни, а коефіцієнти c_0, c_{n+1}, c_{n+2} застосовуються для кожної ділянки відрізків.

Важливим результатом аналізу рівняння, що описує криву пожежі є досягнення точки балансу, а саме зони положення при якому початкова швидкість від імпульсу «и» теплового потоку наближається до «0», а точка

приєднання полум'я до фасаду є результатом досягнення значення тиску Δp значення «0». Зазначені граничні умови можливо виразити у наступному вигляді [69].

$$\left. \begin{array}{l} z = 0: \quad x = 0 \quad \text{(початковий імпульс)} \\ z = H_A: \quad x = 0, \frac{\partial x}{\partial z} = 0 \quad \text{(точка приєднання)} \end{array} \right\} \quad (2.4)$$

Застосовуючи граничні умови як для точки викиду, так і для точки приєднання, градієнт траєкторії полум'я пожежі в межах досліджуваної дальності становить представлено наступною залежністю [69].

$$\frac{\partial x}{\partial z} = c(n+2) \frac{L_E}{H_A} \left(\frac{z}{H_A} \right)^{n-1} \left(1 - \frac{z}{H_A} \right) \left(\frac{n}{n+2} - \frac{z}{H_A} \right) \quad (2.5)$$

Таким чином, в разі виконання умови, коли ліва частина рівняння (2.5) не дорівнює значенню (0), то траєкторія полум'я стає паралельною стіні, а ефект повторного приєднання полум'я до стіни не відбувається. Умовою, при якій спостерігається даний ефект, матиме вигляд [68]:

$$\frac{x}{L_E} = \begin{cases} \frac{27}{4} \left(\frac{z}{H_A} \right) \left(1 - \frac{z}{H_A} \right)^2 & (0 \leq z \leq H_A) \\ 0 & (H_A \leq z) \end{cases} \quad (2.6)$$

Візуалізація описаних математичних залежностей щодо характеру траєкторії полум'я наведена на рисунку 2.1.

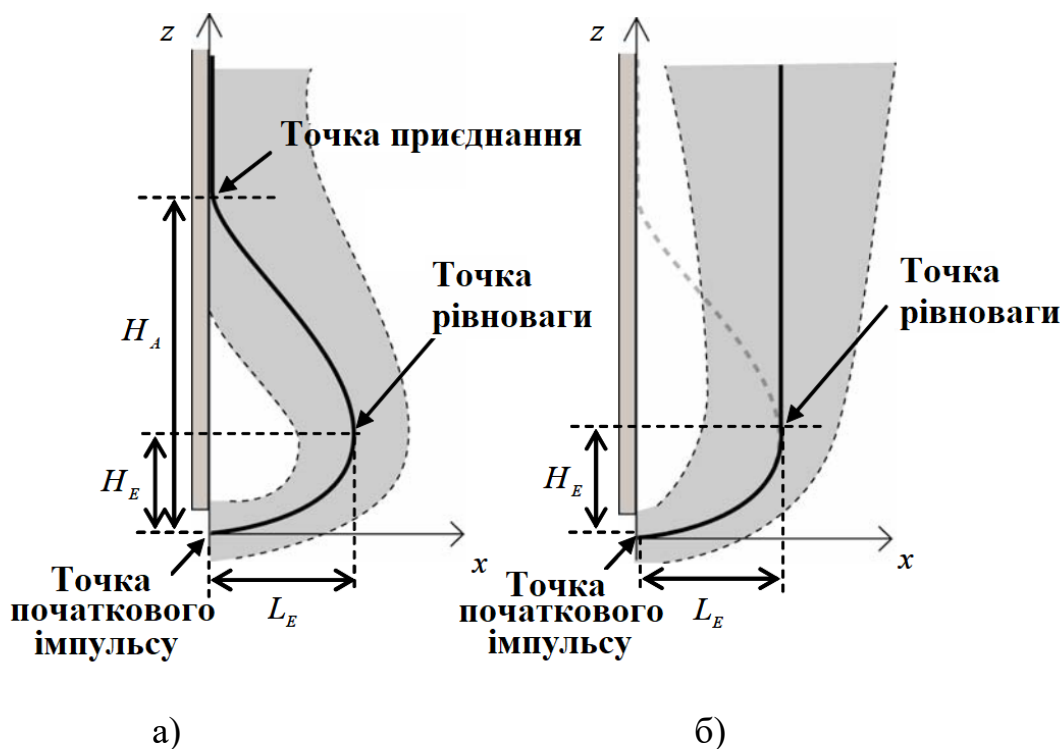


Рисунок 2.1 – Візуалізація залежностей, що описують траєкторію поширення полум'я, де а - траєкторії поширення полум'я при $\Delta p \rightarrow 0$; б - траєкторії поширення полум'я при $\Delta p > 0$.

Вертикальна проекція траєкторії поширення полум'я за рівняннями (3) та (5) та їх змінні, візуалізовано на рисунку 2.2.

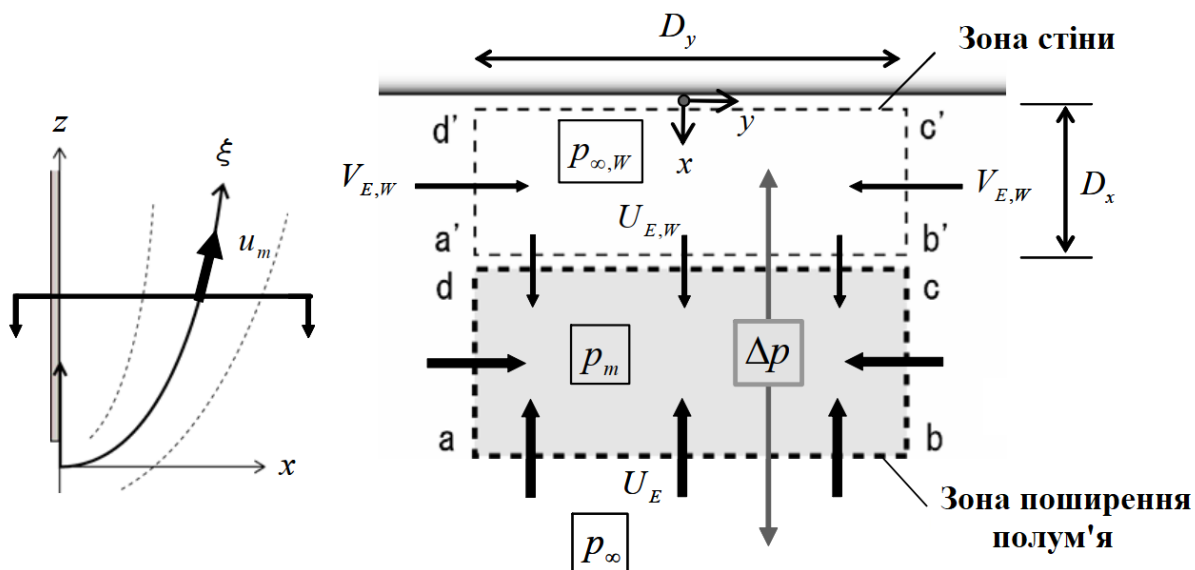


Рисунок 2.2 – Візуалізація змінних залежності, яка описують траєкторію поширення полум'я (вертикальна проекція).

На основі представлених залежностей та умов, при яких спостерігається ефект повторного приєднання полум'я до поверхні фасаду виведено рівняння балансу імпульсу енергій в горизонтальній проекції L_E для різних ділянок висоти фасаду H_A , при цьому баланс швидкості змінюється у напрямку (x) через збільшення різниці тиску. Описане явище описується залежністю:

$$\frac{d}{dx}(bu_m^2) = -\frac{\Delta p}{\rho_\infty}, \quad (2.7)$$

де: b – характерна ширина полум'я в проекції, що прямопропорційно залежить від ширини вікна при зміні швидкості імпульсу в напрямку руху (x) та приймає функцію Гауса.

На підставі експериментальних досліджень [70] підтверджено припущення, що максимальне значення швидкості, тиску та температури зовнішньої пожежі знаходиться безпосередньо під верхнім краєм віконного отвору, а геометрія полум'я має витягнуту вертикально вгору форму. Таким чином, значення різниці тиску можливо виразити наступною залежністю:

$$\frac{d}{dx}(bu_m^2) \sim -\frac{(\alpha u_m)^2}{2} \cdot \left[\frac{1}{1 + (2x/B)^2} \right], \quad (2.8)$$

де значення швидкості u_m описується залежністю:

$$u_m = \phi_2 \cdot \sqrt{g(H - Z_N)} Q'^{1/3}, \quad (2.9)$$

де ϕ_2 – коефіцієнт та безрозмірна величина, яка залежить від ступеню заповнення віконного прорізу; $Q'^{1/3}$ - швидкість тепловиділення, що залежить від джерела пожежі та визначається:

$$Q^* \equiv \frac{\dot{Q}}{\rho_{\infty} c_p T_{\infty} g^{1/2} B (H - Z_N)^{3/2}}, \quad (2.10)$$

де: \bar{Q} – базова швидкість тепловиділення з отвору; c_p – питома теплоємність гасу; T_{∞} – температура навколишнього середовища; g – сила земного тяжіння.

Для визначення умов при якій, можливе забезпечення створення точки відриву від площини фасаду, використовують залежність [70]:

$$\frac{L_E}{B} \sim \frac{1}{2} \tan \left(\frac{4\phi_1}{\alpha^2 \phi_2^2} \cdot F^* \right), \quad (2.11)$$

де F^* – безрозмірний коефіцієнт, який визначається залежністю [70]:

$$F^* \equiv \left(\frac{u_0}{\sqrt{gB}} \right)^2 \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_{\infty} c_p T_{\infty} g^{1/2} B (H - Z_N)^{3/2}} \right)^{-2/3} \quad (2.12)$$

Рівняння (11) описує L_E як дотичну функцію параметру F^* , при цьому існують обмеження, при яких даний параметр має знаходитися в межах діапазону від $-\pi/2$ до $\pi/2$.

Таким чином, математичну модель застосування приведених залежностей для визначення умов приєднання полум'я до поверхні стіни можна виразити за допомогою алгоритму приведенного на рисунку 2.3

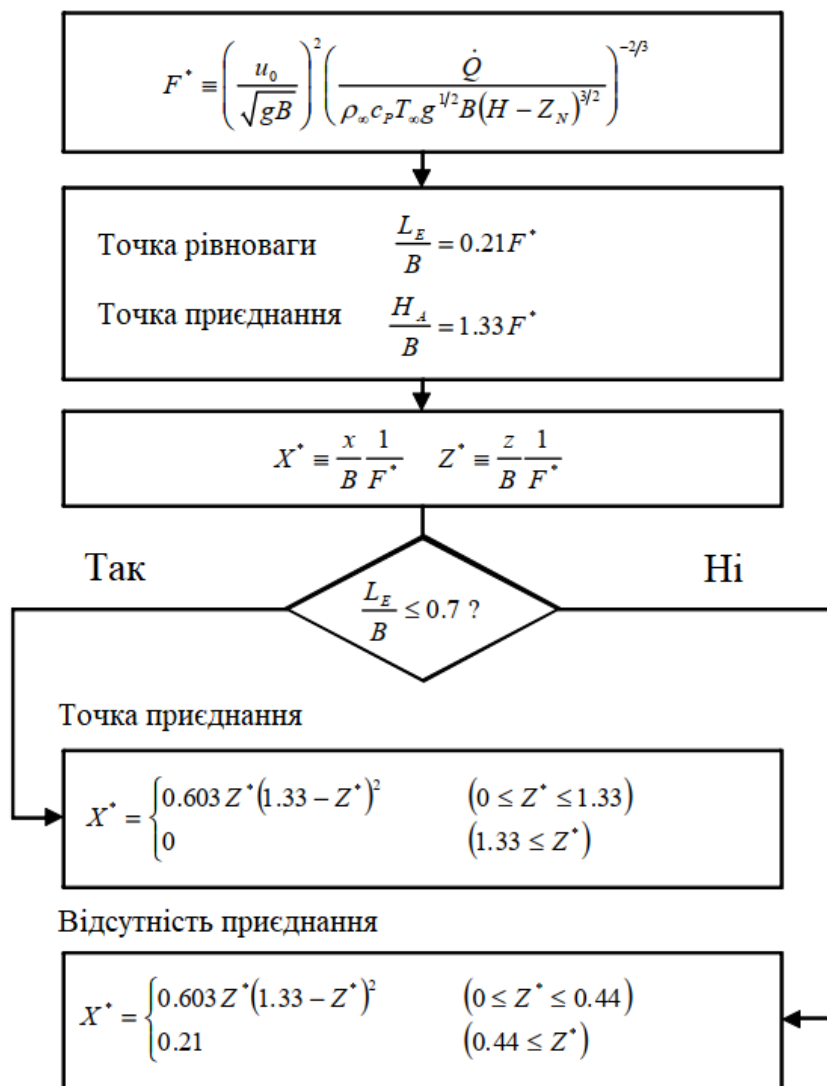


Рисунок 2.3 – Математична модель визначення траєкторії полум'я та умов приєднання/відсутності приєднання до фасаду будівлі.

Однією із умов підвищення ефективності запобігання поширення пожежі ззовні будівель протипожежними карнизами є створення такої траєкторії полум'я, при якій значення тиску (p) та початкового імпульсу (x) не буде досягати нульового значення у пожежонебезпечній зоні фасаду. Забезпечення таких умов та ефективність відведення полум'я у зовнішній простір зменшить температурний вплив на зовнішній фасадні конструкції та матеріали їх облицювання, що є однією із головних передумов збереження їх цілісності.

2.2. Числові алгоритми газо-гідродинамічних моделей динаміки поширення пожежі

Гіпотеза щодо можливості представлення процесу утворення та розвитку поширення пожежі можливо представити математичними залежностями з'явилося фактично на початку виникнення комп'ютерного моделювання [71]. На сьогоднішній день існує та застосовується декілька різних підходів щодо моделювання виникнення та розвитку пожеж. Всі ці підходи базуються на тривимірному середовищі, що розвиваються в часі, на основі польових (зональних) моделей. Відносна фізична та математична простота польових (зональних) моделей призвела до їх широкого використання та відтворення максимально наближених умов до реальності.

В основі польових моделей лежать базові рівняння, Нав'є — Стокса, що є спеціальним рівнянням неперервності, що можна виразити з принципів збереження маси, імпульсу та енергії [72]. Це робиться за допомогою рівняння нерозривності, яке в своїй основі представляє інтегральне співвідношення, яке визначає, що швидкість зміни (похідна) інтегралу на деякому контрольному об'ємі (Ω) від деякої функції (ϕ), має бути рівною сумарним витратам потоку (приток і відток) через границю контрольного об'єму що позначається γ з врахуванням сумарних витрат (притоку і відтоку) елементарних джерел і стоків в середині контрольного об'єму.

Рівняння, які описують залежності перенесення маси, імпульсу та енергії потоками, які викликані пожежею, повинні, як правило, бути представленими у спрощеному вигляді, для можливості їх ефективного розв'язання для всіх можливих сценаріїв пожежі.

Спрощені математичні залежності, розроблені Ремом і Баумом [73], широко застосовуються більшістю дослідників процесів розвитку пожежі, де прийнято їх вважати «низьким мислом Маха» рівняння горіння. Представлені рівняння описують низьку швидкість руху газу, що приводиться в дію хімічним теплом сили імпульсу виштовхування.

Залежності з низьким числом Маха, як правило розв'язують чисельно методом поділу досліджуваного фізичного простору, де виникає пожежа у скінченну кількість комірок прямокутної форми. У кожній комірці швидкість газу, температура, тощо, вважається рівномірними значеннями, які змінюються з часом. Точність розрахунків, з якою динаміка пожежі моделюється, безпосередньо залежить від кількості розрахункових комірок, масштабу моделі та вимірювачам, які розміщені у газовому та твердому середовищі. В основі принципу такої газо-гідродинамічної моделі її масштаб обмежений обчислювальною потужністю комп'ютерної техніки.

Базові рівняння збереження маси, імпульсу та енергії для багатокомпонентної суміші ідеальних газів виражається наступними залежностями:

Рівняння збереження маси [73]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{u} = 0 \quad (2.14)$$

Для індивідуальних газових компонентів, рівняння збереження маси також може бути представлене у виді [73]:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_l) + \nabla \cdot \rho Y_l \mathbf{u} = \nabla \cdot (\rho D)_l \nabla Y_l + \dot{W}_l''' \quad (2.15)$$

Рівняння збереження імпульсу [73]:

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} \right) + \nabla p = \rho \mathbf{g} + \mathbf{f} + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} \quad (2.16)$$

Рівняння збереження енергії [73]:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho h) + \nabla \cdot \rho h \mathbf{u} - \frac{Dp}{Dt} = \dot{q}''' + \nabla \cdot k \nabla T + \nabla \cdot \sum_l h_l (\rho D)_l \nabla Y_l \quad (2.17)$$

Рівняння збереження маси, імпульсу та енергії доповнюються рівнянням стану, який доповнюють термодинамічні величини густини, тиску і ентальпія; ρ , p і h . Тиск розкладається на три компоненти [73]:

$$p = p_0 - \rho_{\infty}gz + \tilde{p} \quad (2.18)$$

Перший член у правій частині рівняння – це «фоновий» тиск (тиск навколишнього середовища), другий компонент – гідростатичний тиск, а третій компонент це - тиск імпульсу, спричинений потоком. Для більшості випадків p_0 є постійним. Проте, якщо моделювання проходить в закритому об'ємі приміщення, а не в умовах відкритого середовища, то p_0 може збільшуватися (або зменшуватися) з часом. Приведене пояснюється тим, що тиск в середині закритого об'єму може збільшуватися (в наслідок теплового розширення) або зменшуватися в наслідок вентиляції.

Значення питомої теплоємності для кожного виду матеріалу можливо представити через число внутрішніх ступенів свободи γ_l активних у молекулі речовини [73]:

$$c_{p,l} = \left(\frac{2 + \nu_l}{2} \right) \frac{R}{M_l} = \left(\frac{\gamma_l}{\gamma_l - 1} \right) \frac{R}{M_l} \quad (2.19)$$

Для умови, коли відношення питомих теплоємностей γ_l для кожного випадку прийняти рівним двоатомній молекулі ($\nu = 5$; $\gamma = 1,4$), то рівняння стану тиску можна описати виразом [73]:

$$p_0(t) = \frac{\gamma - 1}{\gamma} \rho h \quad (2.20)$$

Визначивши матеріальну похідну виразу (7) і використовуючи рівняння збереження маси та енергії, розбіжність поля швидкості (∇u), можна виразити в значеннях термодинамічної величини [73]:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = \frac{\gamma-1}{\gamma p_0} \left(\dot{q}''' + \nabla \cdot k \nabla T + \nabla \cdot \sum_l c_{p,l} T \rho D \nabla Y_l - \frac{1}{\gamma-1} \frac{dp_0}{dt} \right) \quad (2.21)$$

Якщо об'єм середовища, в якому моделюється пожежа щільно закритий (закрите приміщення), фоновий тиск p_0 неправильно приймати постійним через збільшення (або зменшення) маси та теплової енергії всередині об'єму приміщення до моменту руйнування вікна або дверей. Рівняння зростання тиску можливо визити шляхом інтегрування рівняння (2.8) по всій області проведення розрахунку наступною залежністю [73]:

$$\frac{dp_0}{dt} = \frac{\gamma-1}{V} \left(\int_{\Omega} \dot{q}''' dV + \int_{\partial\Omega} k \nabla T \cdot d\mathbf{S} + \sum_l \int_{\partial\Omega} c_{p,l} T \rho D \nabla Y_l \cdot d\mathbf{S} \right) - \frac{\gamma p_0}{V} \int_{\partial\Omega} \mathbf{u} \cdot d\mathbf{S} \quad (2.22)$$

де: V – об'єм приміщення де розвивається пожежа.

Рівняння щодо визначення сили імпульсу можливо спростити шляхом віднімання градієнта гідростатичного тиску з рівняння імпульсу (2.21) та ділення на густину, в результаті отримаємо залежність [73]:

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \frac{1}{2} \nabla |\mathbf{u}|^2 - \mathbf{u} \times \boldsymbol{\omega} + \frac{1}{\rho} \nabla \tilde{p} = \frac{1}{\rho} ((\rho - \rho_{\infty}) \mathbf{g} + \mathbf{f} + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}) \quad (2.23)$$

У газо-гідродинамічних чисельних моделях є декілька можливостей обробки динамічної в'язкості μ . Для бурхливого турбулентного потоку моделювання (LES), де роздільна здатність розрахункових комірок недостатньо точна (більше ніж $0,25 \text{ м}^2$), щоб охопити процеси змішування на всіх відповідних масштабах, слід застосовувати модель масштабу квазі-комірки для врахування в'язкості. За результатом проведеного аналізу Смагоринського [74], в'язкість потоку можна моделювати у вигляді:

$$\mu_{LES} = \max (\mu_{DNS}, \rho (C_s \Delta)^2 |S|) \quad , \quad (2.24)$$

де: C_s – емпірична константа; Δ – довжина типового порядку розміру комірки розрахункової сітки; $|S|$ – величина тензора деформацій, що визначається [74]:

$$|S|^2 = 2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \quad (2.25)$$

Число Прандтля P_r (критерій подібності теплових процесів в газах і рідинах) та число Шмідта S_c вважаються сталими для даних умов та сценаріїв моделювання. Представлена модель Смагоринського неодноразово вдосконалювалася рядом дослідників [75-77], проте важко оцінити ефект від запропонованих покращень, оскільки структура вогняного шлейфу для великомасштабних пожеж не є стабільною та знаходиться постійно в турбулентному стані. Тому, похибка яка закладається при гіпотезі прийняття постійного значення в'язкості вогню є незначною та дозволяє отримати результати фактично ідентичні отриманим за допомогою моделі Смагоринського [74]. Тобто, модель Смагоринського з постійним значенням показника C_s дає задовільні результати для більшості великомасштабних моделювань. Для прямого чисельного моделювання в'язкості, теплопровідності і коефіцієнту дифузії матеріалу апроксимуються з врахуванням кінетичної теорії. В'язкість 1-го виду визначається як [74]:

$$\mu_l = \frac{26.69 \times 10^{-7} (M_l T)^{\frac{1}{2}}}{\sigma_l^2 \Omega_v} \quad , \quad (2.26)$$

де σ_l – діаметр твердої форми Леннарда-Джонса (Å°); Ω_v – інтеграл зіткнень; T – емпіричне значення функція температури.

Теплопровідність 1-го виду визначається як [74]:

$$k_l = \frac{\mu_l c_{p,l}}{\text{Pr}}, \quad (2.27)$$

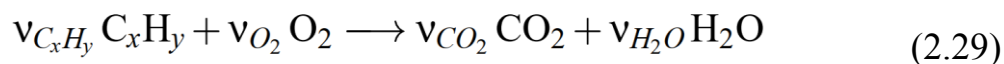
де: число Прандтля Pr відповідає значенню 0,7.

Бінарний коефіцієнт дифузії 1-го порядку, що перетворюється в m -й вид, визначається як [74]:

$$D_{lm} = \frac{2.66 \times 10^{-7} T^{3/2}}{M_{lm}^{1/2} \sigma_{lm}^2 \Omega_D} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}, \quad (2.28)$$

де значення $M_{lm} = 2(1/M_l + 1/M_m)^{-1}$, $\sigma_{lm} = (\sigma_l + \sigma_m)/2$, а Ω_D – емпіричний інтеграл дифузійних зіткнень з функції температури T [78].

Під час моделювання процесів горіння самої пожежної навантаги, як правило використовують одноступеневу хімічну реакцію дифузії палива і кисню. Хімічна реакція одноступеневої хімічної моделі описується рівнянням:



При цьому, швидкість проходження реакції описується виразом [78]:

$$\frac{d[C_xH_y]}{dt} = -B [C_xH_y]^a [O_2]^b e^{-E/RT} \quad (2.30)$$

Слід відзначити, що запропоновані значення B , E , a і b є умовними позначеннями молекул для різних вуглеводневих видів палива, для яких довідкові дані можливо приймати за [79-80]. Розробка більш складних реакцій горіння є предметом подальших досліджень, які постійно удосконалюються.

В якості граничних умов, для моделювання пожеж, в тому числі на зовнішніх огорожувальних конструкціях використовують критичні показники

температури. Вибір значення граничної умови безпосередньо залежить від типу матеріалу поверхні. Серед найпростіших граничних умов є — адіабатична температура поверхні. Тобто матеріал конструкції не має теплообміну з навколишнім середовищем і не буде з ним взаємодіяти в разі пожежі. Проте, для врахування температурної взаємодії матеріалу об'єкту та його товщини з навколишніми умовами пожежі застосовуються наступні рівняння теплопровідності [80]:

$$\rho_s c_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = k_s \frac{\partial^2 T_s}{\partial n^2} ; \quad (2.31)$$

$$-k_s \frac{\partial T_s}{\partial n} \Big|_{n=0} = \dot{q}_c'' + \dot{q}_r'' - \dot{q}_{rr}'' , \quad (2.32)$$

де: ρ_s , c_s та k_s — густина, питома теплоємність і електропровідність матеріалу об'єкту; \dot{q}_c'' , \dot{q}_r'' , \dot{q}_{rr}'' — конвективні, радіаційні та рерадіаційні потоки на поверхні об'єкту.

Для випадків коли матеріал досліджуваної поверхні вважається термічно тонким, його температура визначається його густиною, питомою теплоємністю та товщиною δ . Радіаційний тепловий потік, що діє на поверхню, (\dot{q}_r'') розраховується з врахуванням припущення, що задана частка тепла, яка виділяється від горіння теплових елементів, випромінюється, і ця енергія поглинається оточуючими поверхнями, а також димовими газами. У даній точці x_s на твердій поверхні радіаційний потік визначається як [80]:

$$\dot{q}_r'' = \sum_{i=1}^{N_p} \cos(\phi_i) \frac{\chi_r \dot{q}_{p,i}}{4\pi |x_{p,i} - x_s|^2} e^{-\int \kappa(l) dl} , \quad (2.33)$$

де: $x_{p,i}$ — положення в системі координат; $\dot{q}_{p,i}$ — швидкість тепловиділення i -го термоелемента; d_l — фрагмент прямого відрізка, який сполучає точки $x_{p,i}$ та x_s ; ϕ_i — кут, утворений нормаллю до поверхні по вектору $x_{p,i} - x_s$.

Енергія від нагрітої стіни втрачається у вигляді теплового випромінювання відповідно [80]:

$$\dot{q}_{rr}'' = \sigma \varepsilon (T_s^4 - T_\infty^4) \quad , \quad (2.34)$$

де: σ – постійна Стефана-Больцмана $\sigma = 5.67 \times 10^{-8}$ Вт/м²/К⁴; ε – коефіцієнт випромінювання поверхні.

Таким чином, описано основні числові алгоритми газо-гідродинамічних моделей динаміки поширення пожежі, які застосовуються для дослідження різних сценаріїв пожежі під час комп'ютерного моделювання. Приведені залежності лежать в основі алгоритмів програмного забезпечення FDS (Fire Dynamics Simulator) для моделювання динаміки пожежі та поширення диму, що дозволить дослідити закономірності пливу параметрів фасадних протипожежних перешкод на процеси обмеження поширення пожежі на різні частини будівель.

2.3. Моделювання процесів обтікання газовим потоком твердих тіл

Дослідження та розрахунок впливу вітрових навантажень з врахуванням конвекційної складової фасадів будівель є одним із базових частин проектної документації висотних будівель [81]. Процеси взаємодії теплових потоків з поверхнею зовнішньої огорожувальної конструкції залежить від широкого переліку чинників, а саме:

- орієнтації поверхні конструкції відносно теплового потоку;
- напрямок потоку, його швидкість та щільність;
- кут нахилу площини поверхні відносно площини землі;
- вплив щільності забудови та суміжно розташованих будівель;
- текстура поверхні та її матеріал;
- різниця температури поверхні та навколишнього середовища.

Аеродинамічні залежності для висотних будинків мають свою специфіку,

оскільки розсіювання потоків та вітрові впливи можуть значно впливати на процеси поширення пожежі, зокрема бути причиною її стрімкого поширення. При цьому, дослідження [82] свідчать, що в залежності від висоти будівлі барометричний тиск та швидкість вітру є обернено пропорційними чинниками, а саме атмосферний тиск знижується приблизно на 1 ГПа через кожні 8 м висоти, а швидкість вітру збільшується, а саме залежність зміни швидкості вітру за висотою має вигляд [83]:

$$t_h = t_0 - 0,0065 \times h, \quad (2.35)$$

$$p_h = p_0 (1 - 2,25577 \times 10^{-5} \times h)^{5,2559}, \quad (2.36)$$

де: t_h – температура; p_h – тиск; h – висота, для якої проводиться розрахунок; t_0 та p_0 – значення тиску та температури біля поверхні землі.

Дослідження присвячені зміні швидкості повітряного потоку в зоні фасаду в залежності від висоти будівлі показав, що значення такої швидкості для рівня висоти 30 м та 150 м можуть відрізнятися фактично в двічі. При цьому, в результаті різниці температур між зовнішнім середовищем та більш теплою поверхнею фасаду утворюється конвективний тепловий потік, спрямований догори будівлі, що спонукає утворенню так званого приповерхневого (прикордонного) шару рухомого повітря [84]. Також дані дослідження визначають, що в разі суміжного розміщення будівлі на відстані до 30 м, між ними утворюється додаткові турбулентні течії, які додатково підвищують таку швидкість потоку повітря вздовж фасаду, що наведено на схемі рисунку 2.4.

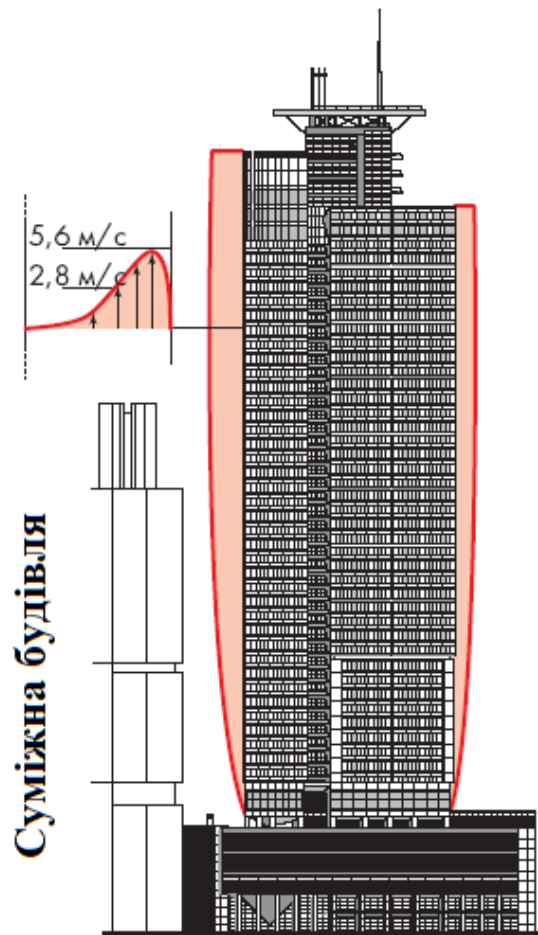


Рисунок 2.4 – Приклад епюри швидкості зовнішніх повітряних потоків біля зовнішньої поверхні будівлі.

Слід розуміти, що приведені залежності та закономірності, є справедливими для оцінювання поширення руху повітряних потоків без врахування додаткової дії зовнішньої пожежі та її супутніх чинників. Таким чином, розв'язок задачі щодо визначення закономірностей поширення середнього потоку з усереднених рівнянь Нав'є-Стокса (RANS) Рейнольдса, з врахуванням моделей турбулентності з великим вихором виглядає як [85]:

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.37)$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + \frac{\partial U_i U_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_j} + \nu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{\overline{\partial u'_i u'_j}}{\partial x_j}, \quad (2.38)$$

де: U_i – вектор середньої швидкості; u'_i – коливання вектору швидкості.

Виходячи з викладеного, кінематика обтікання прямокутних виступів або n -ї кількості виступів прямокутного профілю протипожежного карнизу спонукає утворення численних турбулентних вихорів, в результаті чого в даній зоні спостерігається утворення зон розрідженого тиску. Візуалізація даних процесів на прикладі одноступеневої перешкоди прямокутної форми на фасаді, а також математичний опис складових даної залежності наведено на рисунку 2.5 [85].

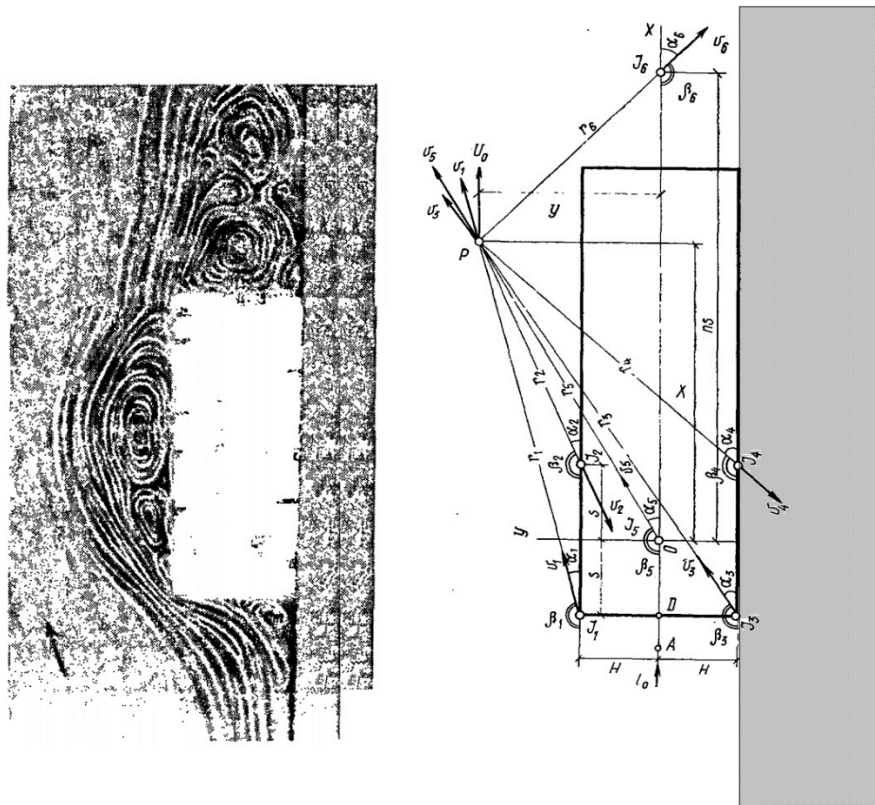


Рисунок 2.5 – Кінематика обтікання повітряним потоком прямокутних перешкод на фасаді.

Таким чином, можливо зробити припущення, що в разі застосування у якості фасадних протипожежних перешкод (протипожежних карнизів) прямокутних виступів або багатограних виступів загального прямокутного профілю, можливо створити зону найменшої швидкості від початкового імпульсу та максимального тиску поза зоною фасадної площини та уникнути утворення точки повторного приєднання полум'я в зоні самого фасаду. На

рисунку 2.6 наведено схему реалізації даної моделі.

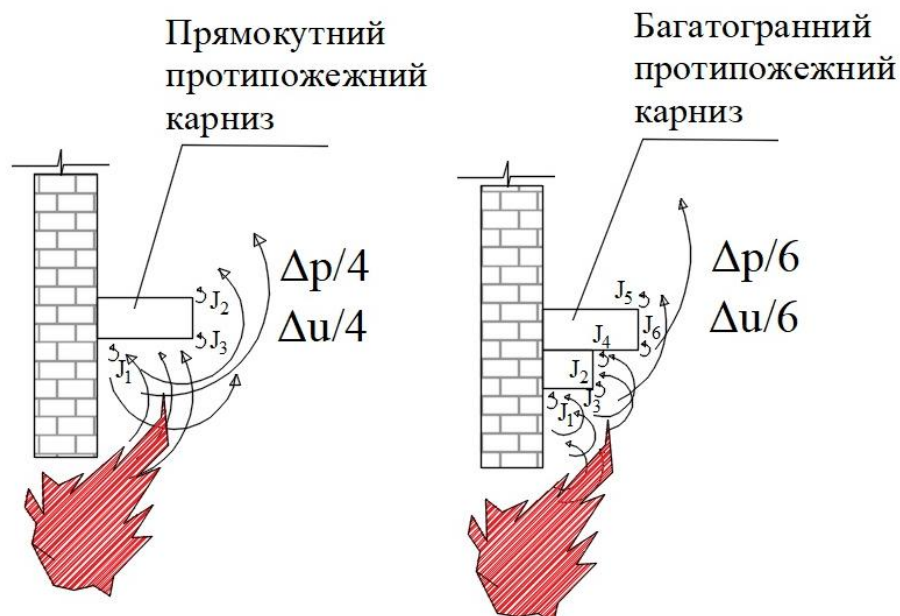


Рисунок 2.6 – Візуалізація функції завихрення складного багатоступеневого потоку для різних карнизів з різною кількістю виступів.

Функція завихрення складного багатоступеневого потоку рівна сумі функцій простого паралельно-висхідного потоку, що виражається залежністю [85]:

$$\Psi = U_0 Y + \left(\frac{L}{2\pi}\right)(\alpha_1 - \alpha_2) + \left(\frac{L}{2\pi}\right)(\alpha_3 - \alpha_4) + \left(\frac{L_0}{2\pi}\right)(\alpha_5 - \alpha_6) \quad (2.39)$$

При цьому, для даної залежності перший член правої частини залежності являє собою функцію простого паралельно-висхідного потоку зі швидкістю U_0 , другий та третій члени характеризують функції утворення вихрових джерел J_1 ; J_3 та функції спаду J_2 ; J_4 з витратою L . Кути, що формують форму перешкоди та входять у загальну форму фасадної протипожежної перешкоди визначаються залежностями [85]:

$$\left. \begin{aligned} \alpha_1 &= \arctg [(Y - H)/(X + s)]; \alpha_2 = \arctg [(Y - H)/(X - s)]; \\ \alpha_3 &= \arctg [(Y + H)/(X + s)]; \alpha_4 = \arctg [(Y + H)/(X - s)]; \\ \alpha_5 &= \arctg Y/X; \quad \alpha_6 = \arctg [Y/(X - ns)]. \end{aligned} \right\} \quad (2.40)$$

Таким чином, з вище наведеного можливо відмітити, що чим більше в конструкції фасадної протипожежної перешкоди буде утворено вихрових джерел J_n тим більше буде відповідно відбуватися функції спаду, та як наслідок, енергія висхідного теплового потоку буде зменшуватися та втрачати свій потенціал не досягаючи пожежонебезпечних зон фасаду.

Разом із цим, варто відмітити, що згідно представленої теорії процесів поширення зовнішньої пожежі та запропонованих принципів її обмеження, застосування протипожежних карнизів із гладкою формою зовнішньої поверхні, може спричинити явище підвищеного тиску та швидкості висхідного потоку, що в свою чергу спричинити втрати «зони рівноваги» безпосередньо біля світлового прорізу вище розташованого поверху, та як наслідок, спричинити руйнування його заповнення.

Представлені дослідження демонструють, що форма та конструктивні параметри протипожежних карнизів можуть значно впливати на ефективність обмеження поширення пожежі, а для окремих випадків можуть бути навпаки – причиною стрімкого поширення вогню на вище розташовані поверхи будівлі. Таким чином, в подальших дослідженнях доцільно систематизувати типові конструктивні види протипожежних карнизів для визначення показників їх ефективності, що дозволить їх більш ефективно застосовувати для різних випадків обмеження пожежі між різними функціональними зонами будівель та різними вертикальними протипожежними відсіками [86].

Окремою задачею є дослідження умов, при яких рух теплового та полуменевого потоку може поширитись з вертикальної частини поверхні фасаду на горизонтальну частину конструкції будівлі, як приклад, покрівлю. Оскільки плоско-вертикальний потік, що рухається уздовж фасаду, може втратити свій баланс рівноваги у зоні закінчення стіни (точка А) вогонь та

тепловий потік будуть змінювати свою траєкторію поширення в зону розрідженого тиску (зону вигорання кисню), та як наслідок змінювати свій вектор поширення в зону покрівлі.

Тобто, з точки зору обмеження поширення пожежі для зони покриття будівлі доцільно розглянути два варіанти, з врахуванням їх конструктивних параметрів, а саме:

- поширення пожежі для суміщених покриттів;
- поширення пожежі по скатному покриттю (горищний дах).

На рисунку 2.7 наведено схему сценаріїв поширення пожежі для окремих типів покриттів будівель.

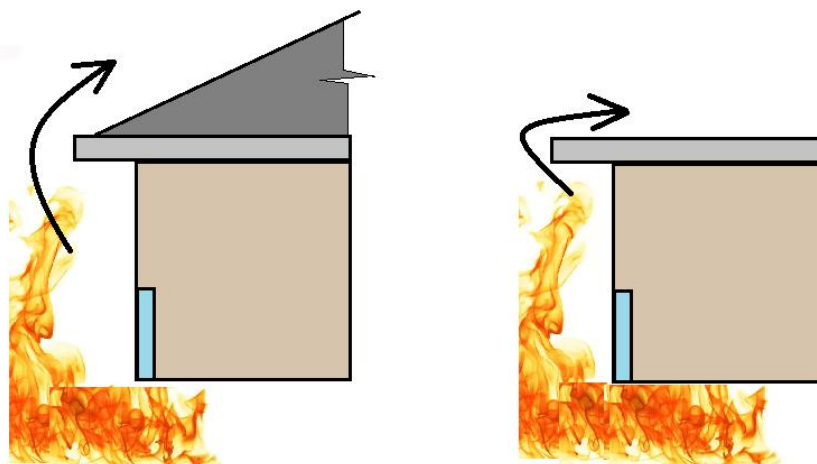


Рисунок 2.7 – Візуалізація схеми поширення пожежі на покрівлю, що обладнана фасадною протипожежною перешкодою.

Таким чином, конструктивне виконання покрівлі може суттєво вплинути на ефективність застосування фасадного протипожежного карнизу, при цьому в разі застосування протипожежного карнизу із формою виступу, яка спричиняє явище повторного приєднання полум'я для скатних покрівель існує значний ризик поширення пожежі. Зазначене обумовлює необхідність дослідити моделі утворення різних видів траєкторії полум'я та умов приєднання або відсутності приєднання полум'я до різних функціональних зон фасаду будівлі

2.4. Висновки до розділу

1. Здійснено аналіз існуючих математичних моделей поширення полум'я крізь світлові прорізи ззовні фасаду та визначено основні типи траєкторій поширення фасадних пожеж, в основі яких закладений принцип утворення початкового горизонтального імпульсу, з подальшим трансформуванням у вертикальний, через силу виділення теплового потоку, що може спричинити подальше поширення пожежі на верхні частини фасаду будівлі.

2. На основі ідеї застосування фасадних протипожежних перешкод для утворення траєкторії поширення полум'я без можливості повторного його приєднання до фасаду визначено критерій ефективності для різних типів форм протипожежного карнизу, який полягає в досягненні точки балансу, де початкова швидкість від імпульсу «u» теплового потоку наближається до нуля, а точка приєднання полум'я до фасаду є результатом досягнення значення нуля для тиску Δp . Це дозволило розробити математичну модель визначення траєкторії полум'я та умов приєднання/відсутності приєднання до фасаду будівлі.

3. Узагальнено та систематизовано перелік граничних умов для моделювання процесів поширення зовнішньої пожежі, які характеризують небезпеку її розвитку, в основі яких лежить врахування фактичних даних щодо орієнтації поверхні конструкції фасаду відносно теплового потоку, напрямку теплового потоку, його швидкість та щільність, кут нахилу фасаду, вплив щільності забудови та суміжно розташованих будівель, а також текстура поверхні фасаду та матеріал його опорядження.

4. Дослідження функції завихрення складного багатоступеневого потоку дозволяє висунути гіпотезу, що в разі застосування у якості фасадних протипожежних перешкод прямокутних виступів або багатогранних виступів загального прямокутного профілю, можливо створити зону найменшої швидкості від початкового імпульсу та максимального тиску поза зоною фасадної площини та уникнути утворення точки повторного приєднання полум'я в зоні самого фасаду і тим самим зменшити ризик стрімкого поширення фасадної пожежі.

РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ОБМЕЖЕННЯ ПОШИРЕННЯ ПОЖЕЖІ ЗЗОВНІ БУДІВЛІ ЗА ДОПОМОГОЮ ОБЧИСЛЮВАЛЬНОЇ ГАЗО-ГІДРОДИНАМІКИ

Розділ присвячено практичній реалізації та апробації результатів дослідження. На основі сформованої програми та створеної базової обчислювальної газо-гідродинамічної моделі, що основана на рівняннях теплообміну проведено дослідження закономірностей впливу конструктивних параметрів протипожежних карнизів на ефективність запобігання вертикального поширення пожежі за визначеними критеріями. Моделювання роботи найбільш поширених типів протипожежних карнизів дозволило оцінити їхню ефективність, а узагальнення експериментальних даних – виявити ключові залежності, необхідні для практичних рекомендацій.

3.1. Формування програми досліджень поширення пожежі ззовні будівлі та дослідження умов запобігання її поширення

Застосування газо-гідродинамічних моделей для дослідження та оцінювання процесів поширення пожежі, а також умов її запобігання, є одним із найбільш поширених сучасних методів досліджень [87-88]. В основі більшості обчислювальних газо-гідродинамічних моделей заснованих на закономірностях тепломасопереносу, закладений математичний апарат, який побудований на рівняннях Нав'є-Стокса для низькошвидкісних температурно-залежних потоків під час полуменевого горіння. Симуляція пожежі та відтворення її різноманітних сценаріїв виникнення та розвитку за допомогою програмного забезпечення fire dynamics simulator (FDS) дозволяє розрахувати наслідки та інформативно візуалізувати отримані результати, що неодноразово демонструвалася в ряді наукових досліджень [89-91]. При цьому, численні дослідження щодо верифікації отриманих результатів, отриманих на основі відтворених моделей горіння, демонструють досить високу точність та

збіжність результатів проведених досліджень на основі газо-гідродинамічних моделей.

В основі програми досліджень поширення пожежі ззовні будівлі та дослідження умов запобігання її поширення закладається принцип відтворення сценарію, коли вогонь вільно поширюється крізь вікно, уздовж фасаду, на вище розташований поверх та обмежується різними типами фасадних протипожежних перешкод. Зокрема, під час створення моделі за основу принципу досліджень, методології, масштабу, конструктивного виконання взято «Експериментальну установку для прогнозування поширення пожежі по фасадам будівель» [92-93], а також програму натурних вогневих досліджень процесів обмеження поширення пожежі по зовнішнім огорожувальним конструкціям, обґрунтовану в роботах [94-95].

Під час проведення розрахункових дій для моделювання залежностей поширення пожежі вздовж фасаду, питому теплоту згорання пожежної навантаги приймаємо 780 МДж/м^2 , як максимальне значення пожежної навантаги для житлових будинків згідно з [90; 96-97], при цьому лінійна швидкість поширення пожежі згідно з даними [98] прийнята $1,5 \text{ м/хв}$.

Програма експериментальних досліджень включає етап створення моделі вертикального фрагменту фасаду будівлі в межах двох поверхів, а саме поверху та віконного прорізу, де відбувається пожежа та поверху на який вона впливає і який захищається протипожежним карнизом. Параметри кратності обчислювальної області (сітки FDS) для розробленої моделі становить $0,1 \text{ м}^2$, що обґрунтовується геометричними розмірами моделі фасаду та кратності розмірів комірок розрахункової сітки щодо геометричних параметрів протипожежного карнизу. В моделі передбачено функцію візуалізації температурних розподілів на поверхні фасаду та конструкції вікна в результаті дії змодельованої пожежі. Згідно прийнятого сценарію змодельованої пожежі вона утворилася та розвивається в об'ємі поверху, який розташований безпосередньо під досліджуваним протипожежним фасадним карнизом, при

цьому у даному приміщенні віконний проріз є відкритим, а утворюваний тепловий потік та полум'я вільно поширюються із отвору.

Враховуючи, що комп'ютерна модель передбачає максимальне врахування всіх основних чинників, які впливають на процеси поширення зовнішньої пожежі, створена газо-гідродинамічна модель передбачала врахування фізичних характеристик матеріалів конструкцій, які в ній відтворювалися. На рисунку 3.1 наведено її зовнішній вигляд.

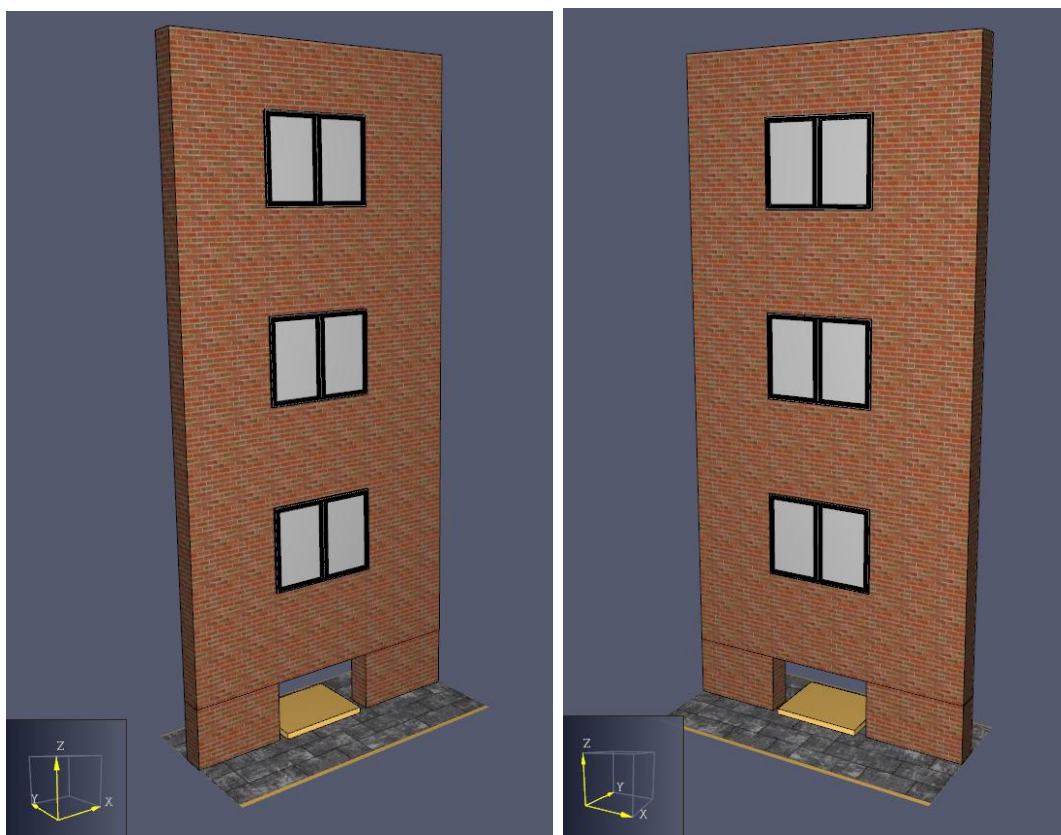


Рисунок 3.1 – Загальний вигляд моделі фрагменту фасаду для дослідження процесів обмеження поширення пожежі ззовні будівлі.


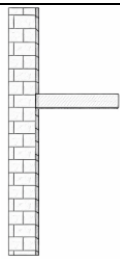
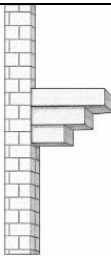
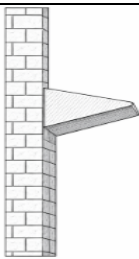
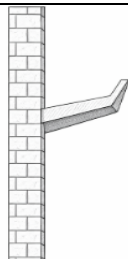
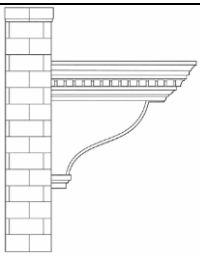
В основі конструкції моделі фрагменту будівлі використовувалася повнотіла клінкерна цегла густиною 1890 кг/м^3 , питома теплоємність $0,82 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$ та теплопровідністю $0,64 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$. В якості конструкції заповнення світлових прорізів використано полімерні рами із густиною 1230 кг/м^3 , питома теплоємність $0,67 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$ та теплопровідністю $0,23$

Вт/(м·К) та скло густиною 2570 кг/м³, з питомою теплоємністю 0,68 кДж/(кг·К) та теплопровідністю 0,063 Вт/(м·К).

В якості критерію, яким характеризує небезпеку поширення пожежі ззовні фасаду прийнято значення температури у 250 °С, що відповідає температурі деформування основного матеріалу з найменшим температурним опором, а саме конструкції вікон згідно з [99].

Базова модель фасаду не передбачає влаштування будь якого з досліджуваних типів протипожежного карнизу в зоні перекриття між поверхами. Отримані дані для фасаду, який не захищено карнизом під час пікових значень температурного режиму у вогневій камері, щодо площі критичного прогріву, швидкості висхідного теплового потоку, як елемент конвекційної складової, значення тиску в зоні фасаду та значення температури в досліджуваній зоні є відносними диктуючими даними. Ці диктуючі дані порівнюються з усіма наступними даними, які будуть отримані в результаті обладнання фасаду протипожежними карнизами наступних досліджуваних типів. В таблиці 3.1 наведено систематизовані типи протипожежних карнизів, які будуть досліджуватися за допомогою обчислювальної газо-гідродинаміки.

Таблиця 3.1 – Досліджувані типи протипожежних карнизів

Фасад без карниза	Протипожежний карниз з прямою формою	Протипожежний карниз з формою багатогранника	Протипожежний карниз з формою гострої трапеції	Протипожежний карниз з формою «вінглету»	Протипожежний карниз з заокругленою формою виступу
					

Під час проведення моделювання та досліджування відносної ефективності для кожного досліджуваного типу карнизу, розрахунки проводилися для ширини карнизів 0,3 м; 0,5 м; 0,75м; 1,0 м; 1,25 м та 1,5 м.

Тривалість проведення моделювання для кожного досліджуваного типу карнизу складала не менше 30 хвилин, що відповідає максимальному значенню межі вогнестійкості для зовнішньої стіни у будівлі I ступеню вогнестійкості, згідно з вимогами [3]. Окрім цього, дана тривалість досліджень також задовольняє критерій, що висувається до нормативного часу прибуття пожежно-рятувальних підрозділів у місті.

Для можливості додаткової візуалізації отриманих даних для зони фасаду, яка захищається, щодо значення температури, площі критичного прогріву, швидкості висхідного теплового потоку та значення тиску використовується 3-D область висотою та шириною 5 м на 5 м. На рисунку 3.2 наведено область 3-D візуалізації отриманих результатів, а також зону влаштування досліджуваних типів протипожежних карнизів.

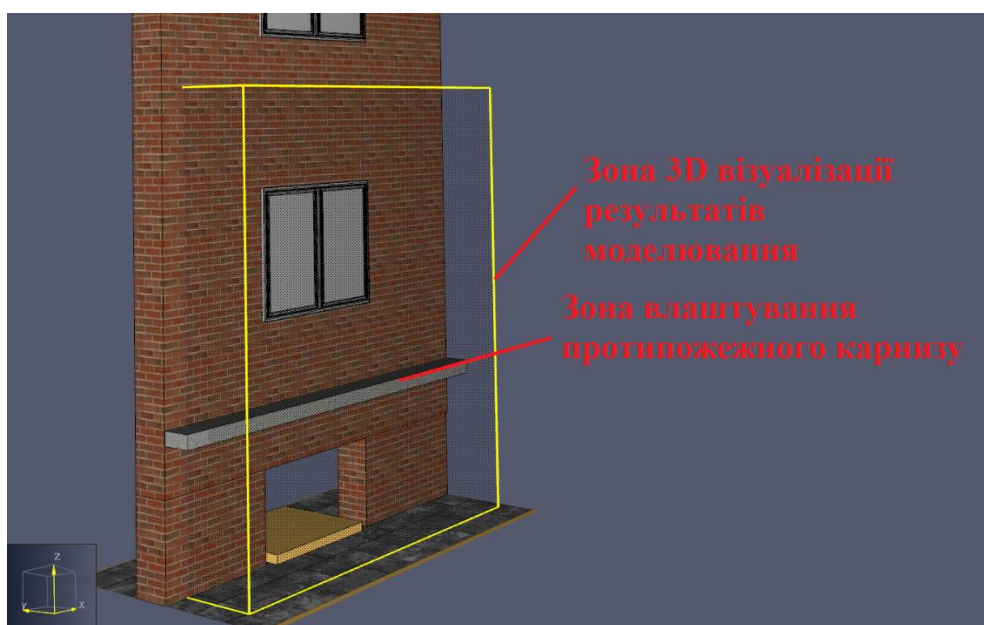


Рисунок 3.2 – Зона візуалізації отриманих результатів та зона влаштування досліджуваних типів протипожежних карнизів для моделі.

Під час проведення моделювання, враховувалася наявність бокового вітру в межах до 5-6 м/с, що згідно досліджень [100-101] характерний для фасадів будівель, які розміщені на висоті в межах 40-100 м. Таким чином, під час проведення моделювання розглядалося два сценарії, а саме без впливу вітру

та при наявності бокового вітру із швидкістю 5 м/с.

Як правило, під час моделювання процесів поширення зовнішньої пожежі можливий вітровий вплив не застосовується, через те, що він може створювати зменшення густини і однорідності теплового потоку та зменшувати висоту факелу вогнища пожежі [102]. Даний підхід обумовлюється тим, що в разі наявності супутніх чинників, отримати «чисті» дані щодо впливу досліджуваного типу карнизу на процеси обмеження поширення зовнішньої пожежі є неможливим. Разом із цим, в разі всебічного дослідження процесів поширення зовнішньої пожежі, та здійснення оцінки впливу супутніх зовнішніх чинників на процеси поширення пожежі, зокрема вітру, слід враховувати, що вітер, який має направлення в сторону фасаду споруди, утворюватиме підпір та зону підвищеного тиску, при якому повітря з меншою температурою нагріву через завихрення потраплятиме в зону прогріву фасаду і відповідно буде охолоджувати зовнішні конструкції будівлі. Таким чином, під час моделювання та дослідження процесів поширення пожежі ззовні будівлі та відповідно умов запобігання її поширення вітрові навантаження задаються під прямим кутом відносно площини фасаду.

Дослідження для розв'язання визначених задач даної методики здійснюються за умови відсутності атмосферних опадів та з наступними умовами навколишнього середовища:

- температура повітря від 30 °С;
- атмосферний тиск від до 90 кПа;
- відносна вологість повітря 50 %;
- швидкість вітру 0 м/с та 5 м/с (два окремих дослідження для кожної умови).

В якості вогнища пожежі використовуватиметься макетне вогнище пожежі прямокутної форми розмірами 1 м × 1 м. при цьому пожежна навантага якого складає 780 МДж/м², а в основі матеріалу горіння використано рідке паливо (дизель). У продовж усієї тривалості проведення розрахункових дій робота систем автоматичного пожежогасіння або систем димовидалення не враховувалася, і пожежа вільно розвивалася у продовж всієї процедури

проведення дослідження. За результатом проведених досліджень поширення пожежі ззовні будівлі та дослідження умов запобігання її поширення для кожного типу протипожежного карнизу, отримані дані вносяться до зведеної таблиці, що дозволить сформулювати загальні висновки щодо виявлених закономірностей.

3.2. Створення базової обчислювальної моделі для моделювання процесів поширення пожежі ззовні фасаду

На першому етапі створення комп'ютерної імітаційної моделі фасаду та первинного осередку виникнення пожежі відтворено фасад без протипожежних фасадних перешкод, що має три повноцінних поверхи з висотою кожного 2,7 м, що відповідає вимогам будівельних норм [103], а також вогневу камеру, що є частиною поверху, де моделюється пожежа. Вогнева камера фактично є частиною закритого приміщення, де пожежа з визначеною пожежною навантаженням та швидкістю розповсюдження вільно поширюється крізь відчинене вікно. На рисунку 3.3 наведено тип фасаду базової моделі, а також місце розміщення осередку пожежі.

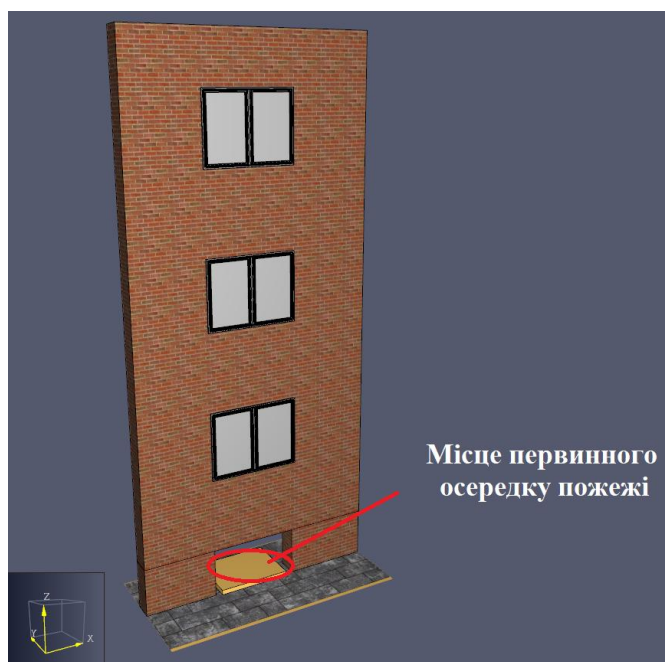


Рисунок 3.3 – Тип фасаду для базової моделі, а також місце розміщення осередку пожежі.

Для забезпечення можливості отримання даних температурних розподілів на поверхні моделі базового фрагменту фасаду, який не обладнаний протипожежним карнизом моделі забезпечено властивість анімованої поверхні фасаду для демонстрації отриманих даних щодо визначених критеріїв оцінки. Також під час проведення розрахункових дій, всі визначені етапи моделювання проводяться згідно із методикою експериментальних вогневих досліджень з дослідження впливу джерела теплового випромінювання на фасадні системи на та процеси поширення пожежі у продовж всієї визначеної тривалості, а саме 30 хв. За результатом моделювання за кожним етапом досліджень фіксується та заноситься до таблиці найбільше значення температури, швидкості теплового потоку, тиску, площі критичного прогріву (більше значення $260\text{ }^{\circ}\text{C}$), які були зафіксовані в зоні кожної досліджуваної ділянки фасаду. Також фіксується висота зони фасаду, де спостерігалось найбільше критичне значення температури. Отримані результати моделювання дозволять зробити висновки щодо виявлених закономірностей поширення пожежі в залежності від типу встановлених фасадних протипожежних перешкод.

За першим етапом моделювання визначено площу критичного прогріву фасаду, а також максимальне значення температури, яке було зафіксоване на площині фасаду. Отримані дані температурних розподілів в результаті дії пожежі представлені для фасаду який знаходився без впливу зовнішніх чинників, а також під час дії бокового вітру із швидкістю 5 м/с при питомій теплоті згоряння пожежної навантаги 780 МДж/м^2 . Площа отвору через який відбувається поширення вогнища пожежі становить $0,9\text{ м}^2$, що відповідає половині площі вікна згідно з [104].

На рисунку 3.4 наведено отримані результати комп'ютерного моделювання.

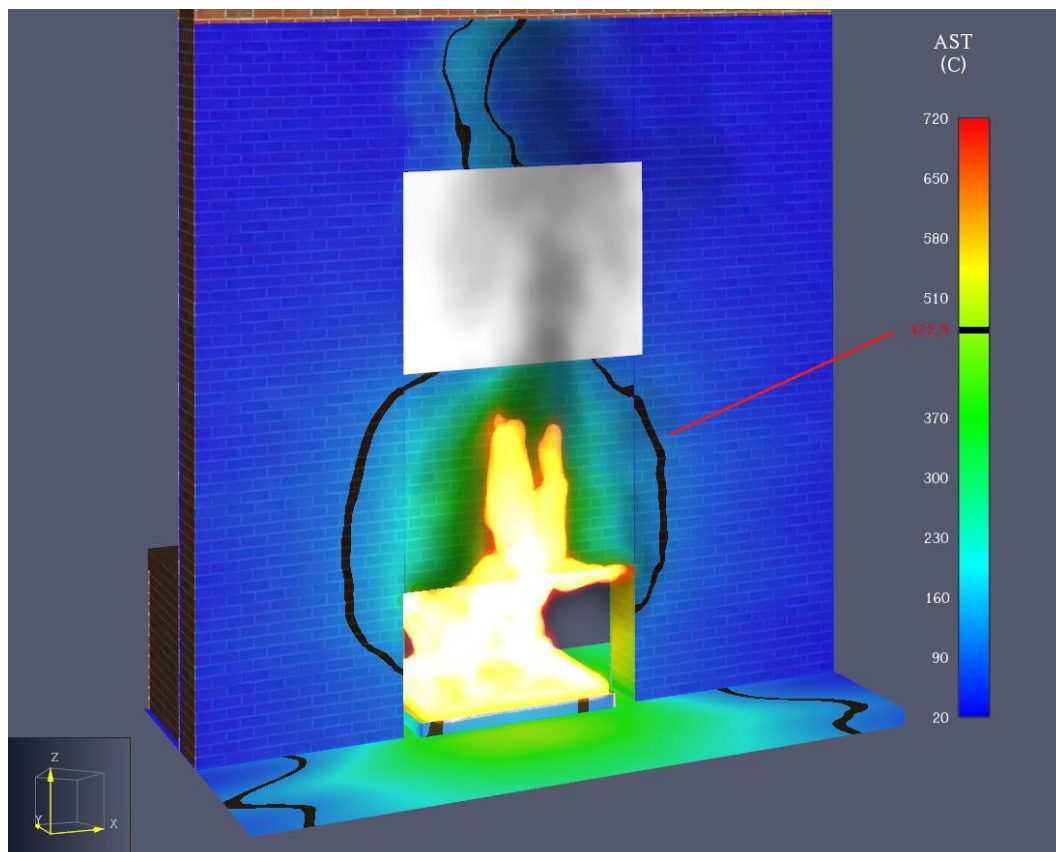


Рисунок 3.4 – Температурні розподіли на поверхні фасаду, який не обладнано протипожежним карнизом при значенні пожежної навантаги 780 МДж/м^2 .

За результатом моделювання встановлено, що фактична площа критичного прогріву на зовнішній поверхні фасаду склала $7,8 \text{ м}^2 (\pm 0,2 \text{ м}^2)$, при цьому максимальне значення температури в зоні його поверхні становило $473 \text{ }^\circ\text{C}$. Максимальне значення температури у вогневій камері склало $915 \text{ }^\circ\text{C}$. Висота зони критичного прогріву зовнішньої сторони фасаду (вище $260 \text{ }^\circ\text{C}$) спостерігається по всій висоті площини досліджуваного фрагменту конструкції та складало до $6,5 \text{ м}$.

Результати моделювання поширення пожежі для базової моделі фасаду при впливі бокового вітру зі швидкістю 5 м/с наведено на рисунку 3.5.

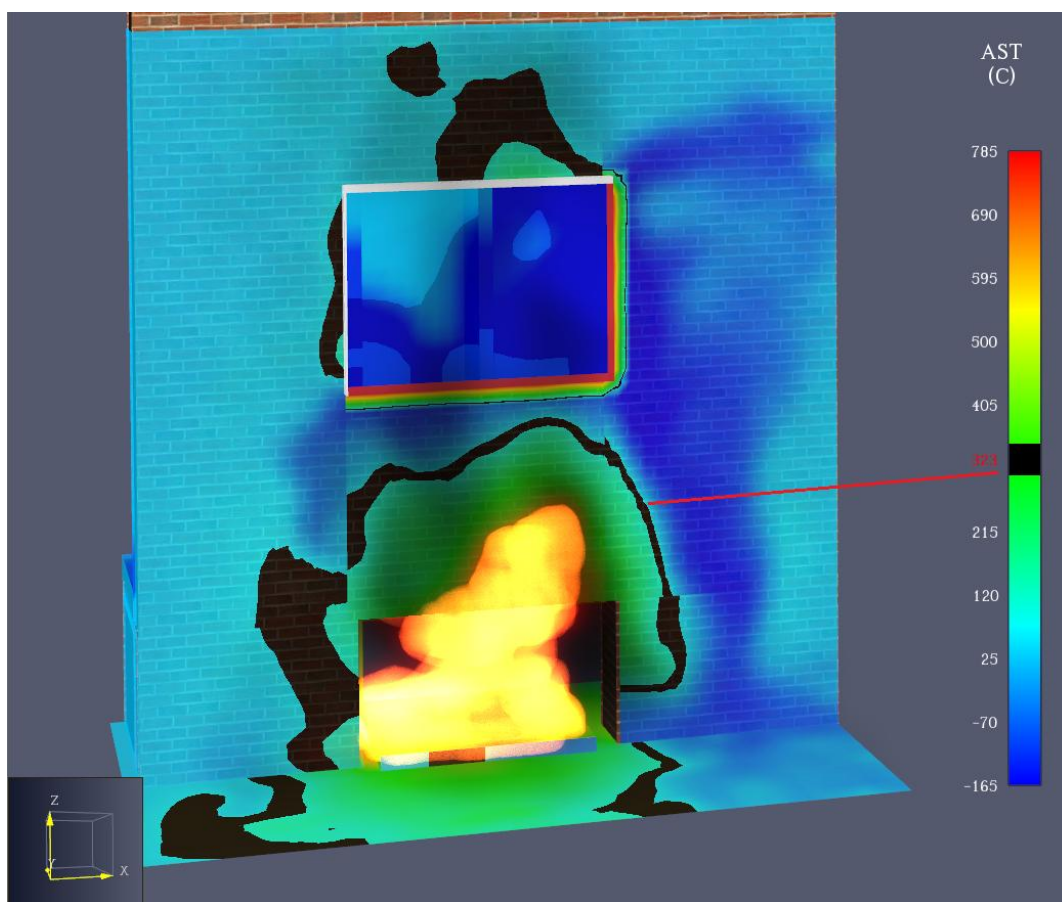


Рисунок 3.5 – Температурні розподіли на поверхні фасаду, який не обладнано протипожежним карнизом при значенні пожежної навантаги 780 МДж/м^2 за наявності бокового вітру.

За результатом даного етапу моделювання встановлено, що фактична площа критичного прогріву на зовнішній поверхні фасаду склала $7,1 \text{ м}^2$ ($\pm 0,2 \text{ м}^2$), при цьому максимальне значення температури становило $323 \text{ }^\circ\text{C}$. Отримані дані свідчать, що наявність бокового вітру значно зменшує температурний вплив на поверхні фасаду (в межах 30-32%), при цьому загальна площа критичного прогріву на зовнішній поверхні фасаду зменшилася на 9%.

Максимальне значення температури від дій пожежі зафіксоване в зоні досліджуваного фрагменту фасаду склало $880 \text{ }^\circ\text{C}$. Висота зони критичного прогріву зовнішньої сторони фасаду (вище $260 \text{ }^\circ\text{C}$) спостерігається по всій висоті площини досліджуваного фрагменту конструкції, проте не мало суцільний характер температурних розподілів, а було зафіксовано у вигляді

окремих нерівномірних зон на висоті до 5,7 м.

За результатом проведеного етапу моделювання визначено значення швидкості висхідного потоку під час пожежі. На рисунку 3.6 наведено візуалізацію отриманих даних для фасаду який не обладнано протипожежним карнизом при значенні пожежної навантаги 780 МДж/м^2 та без впливу бокового вітру.

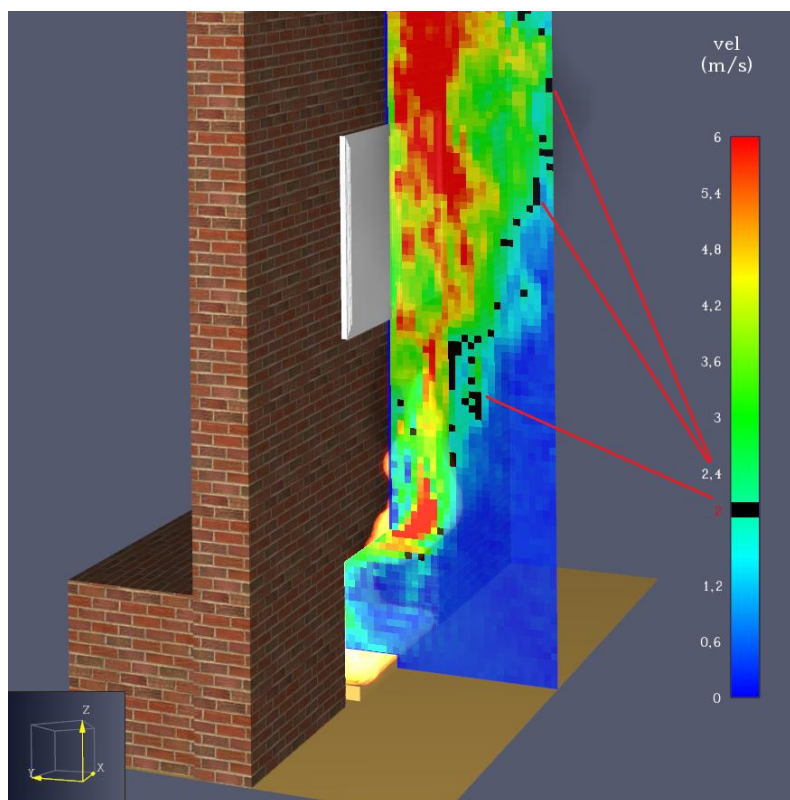


Рисунок 3.6 – Візуалізація швидкості висхідного теплового потоку для базової моделі фасаду без впливу бокового вітру.

За результатом моделювання встановлено, що максимальне значення швидкості висхідного потоку склало до 6 м/с, при цьому, при значеннях швидкості 2,0-2,2 м/с полум'я максимально відводиться від площини фрагменту фасаду, що позначено чорними зонами на рисунку 3.7. Візуалізація швидкості висхідного теплового потоку для базової моделі фасаду під час впливу бокового вітру зі швидкістю 5 м/с наведено на рисунку 3.8.

отримані дані для базової моделі фасаду без впливу бокового вітру та при його наявності.

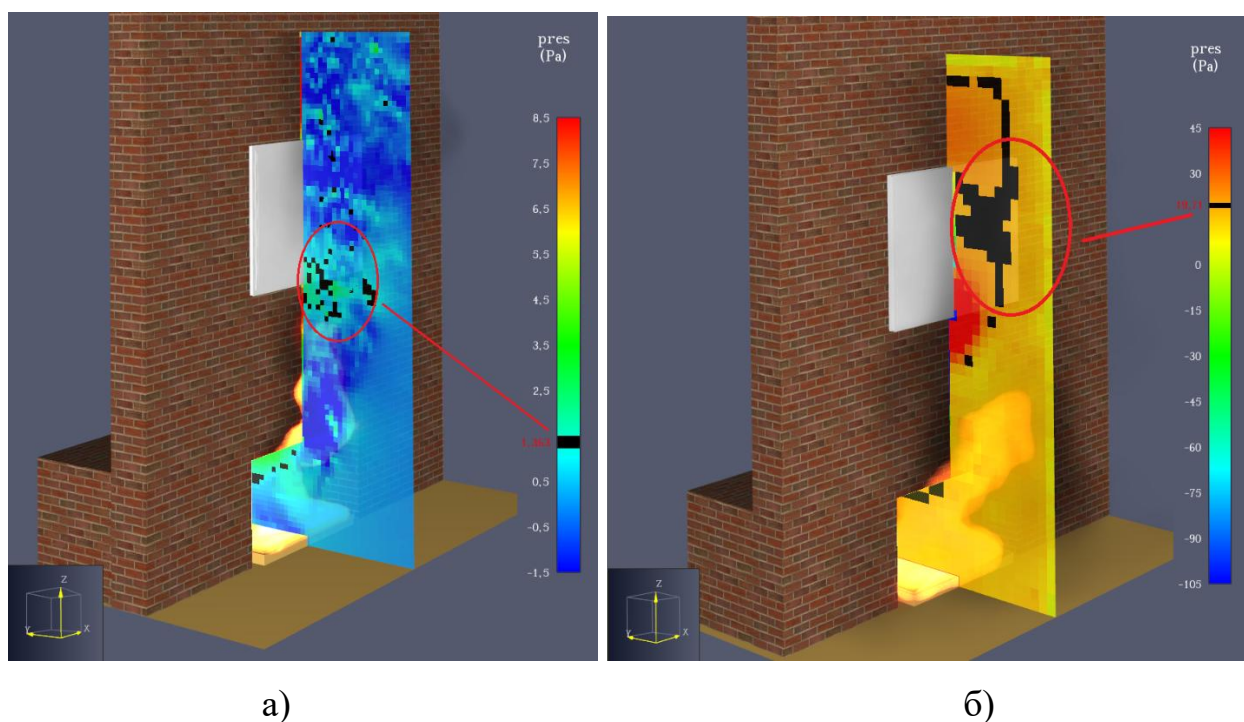



Рисунок 3.8 – Візуалізація тиску в зоні фасаду для базової моделі фасаду де: а – розподіл тиску без впливу бокового вітру; б) розподіл тиску без під час впливу бокового вітру зі швидкістю 5 м/с.

За результатом проведеного моделювання щодо визначення значення тиску в зоні фасаду для базової моделі встановлено, що при відсутності дію бокового вітру, середнє значення тиску в зоні досліджуваного фрагменту фасаду становить 1,2 Па ($\pm 0,4$ Па). При цьому, за аналогічних умов моделювання але при наявності бокового вітру зі швидкістю 5 м/с середнє значення тиску в зоні досліджуваного фрагменту фасаду становить 20 Па ($\pm 2,0$ Па). Отримані дані демонструють, що за наявності бокового вітру тиск в зоні поширення полум'я значно підвищується (фактично в 10-20 разів), що значно впливає на характер поширення пожежі та структуру полум'я пожежі. Зокрема, отримані дані свідчать про утворення зони турбулентності біля зовнішньої поверхні фасаду, що в свою чергу потенційно може впливати на

процеси нагрівання зовнішньої поверхні фасаду та відповідно на стійкість до збереження цілісності тих чи інших елементів його конструкції, облицювання або оздоблення [105-106].

Таким чином, за результатом проведених досліджень на основі базової моделі фрагменту фасаду можливо встановити наступні дані, які впливають та характеризують процеси поширення пожежі на вище розташовані поверхи, що зведені до таблиці 3.2

Таблиця 3.2 – Дані, що характеризують процеси поширення пожежі на вище розташовані поверхи для фасаду не обладнаного протипожежним карнизом

Тип протипожежного карнизу	Ширина карнизу, м	Максимальне значення температури зафіксоване в зоні фасаду, °С, (наявність ефекту повторного приєднання полум'я, «+»)	Площа критичного прогріву, % (±5 %)	Висота зони критичного значення температури, м (±0,2 м)	Середня швидкість висхідного потоку, м/с (±0,3 м/с)	Значення тиску в зоні фасаду, Па (±10 %)
Фасад без карнизу 	відсутній	323/473 (+)	78/73	6,5/5,7	2,1/2,4	1,2/20

Виходячи з вище наведеного, отримані дані приведені в таблиці 3.2 є основою для порівняння аналогічного чисельного експерименту але при застосуванні визначених найбільш поширених типів протипожежних карнизів. Тобто, наступні отримані експериментальні дані для різних типів протипожежних карнизів можливо порівнювати з приведеними в таблиці 3.2 для визначення відносної ефективності за кожним із приведених критеріїв.

3.3. Моделювання процесів поширення пожежі ззовні фасаду обладнаного протипожежними карнизами найбільш поширених типів

Даний етап досліджень спрямований на виявлення залежностей, які характеризують процеси поширення пожежі в залежності від застосованих протипожежних карнизів. Гіпотеза досліджень полягає в тому, що форма та конструктивні параметри протипожежних карнизів можуть значно впливати на ефективність обмеження поширення пожежі, а для окремих випадків можуть бути навпаки – причиною стрімкого поширення вогню на вище розташовані поверхи будівлі. Окрім цього, та чи інша форма протипожежного карнизу може бути більш ефективна для різних частин будівлі що захищаються від поширення зовнішньої пожежі, а саме: для випадків поширення пожежі між протипожежними відсіками, між стилобатною частиною будівлі та висотною, а також для захисту експлуатованої покрівлі.

Під час проведення ком'ютерного моделювання, для можливості проведення аналізу саме конструктивного впливу розроблених моделей фрагмент фасаду моделювався як конструкція, до складу якої входить один базовий матеріал, а саме цегла, без зовнішнього утворювального багат шарового опорядження.

Для першого етапу моделювання застосовувався протипожежний карниз прямої форми із шириною виступаючої частини 0,3 м, 0,5 м, 0,75 м, 1,0 м, 1,25 м та 1,5 м. Досліджувані значення ширини протипожежних карнизів обумовлені національними та зарубіжними вимогами будівельних норм [103]. Таким чином, єдиним змінним параметром, який впливатиме на процеси поширення пожежі ззовні досліджуваного фрагменту фасаду є ширина карнизу при визначеному його типі. Загальна методологія досліджень, параметри навколишнього середовища та значення пожежної навантаги відповідає методиці описаній в розділі 3.1. На рисунку 3.9 наведено створені комп'ютерні моделі для досліджуваних розмірів прямих карнизів.

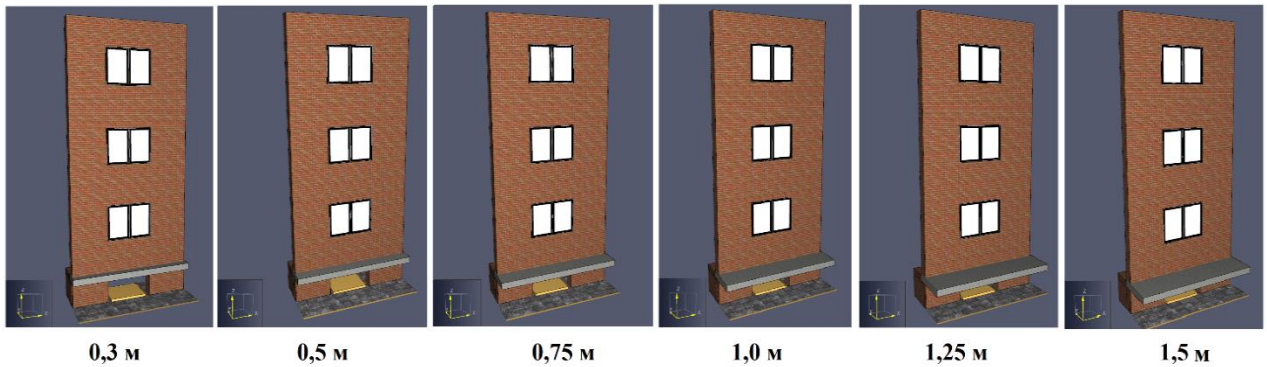


Рисунок 3.9 – Створені комп'ютерні моделі для досліджуваних розмірів прямих карнизів.

Визначені етапи моделювання для кожного значення ширини протипожежного карнизу проводяться згідно із методикою експериментальних вогневих досліджень з визначення впливу джерела теплового випромінювання на фасадні системи на та процеси поширення пожежі у продовж визначеної тривалості у 30 хв. Питома теплота згоряння пожежної навантаги складала 780 МДж/м^2 , при цьому для кожного випадку окремо враховувалася дія бокового вітру із швидкістю 5 м/с . Геометричні параметри фрагменту фасаду та умови навколишнього середовища відповідали стандартним нормативним показникам, що визначені в державних будівельних нормах для житлових та громадських будинків. Це забезпечує відтворюваність результатів моделювання та можливість їх порівняння між різними варіантами конструкцій протипожежних карнизів. У процесі аналізу оцінювалися температурні поля, характер руху полум'я та зонування теплового впливу на поверхню фасаду. Отримані результати дозволяють встановити залежності між геометричними параметрами карнизу та ефективністю обмеження поширення пожежі.

На рисунку 3.10 наведено приклад отриманих температурних розподілів на фасадах при застосування протипожежних карнизів $0,3 \text{ м}$ та $1,5 \text{ м}$, а в таблиці 3.3 наведено та систематизовано температурні розподіли на поверхні фасаду, який обладнано протипожежним карнизом $0,3\text{-}1,5 \text{ м}$ при значенні пожежної навантаги пожежі 780 МДж/м^2 .

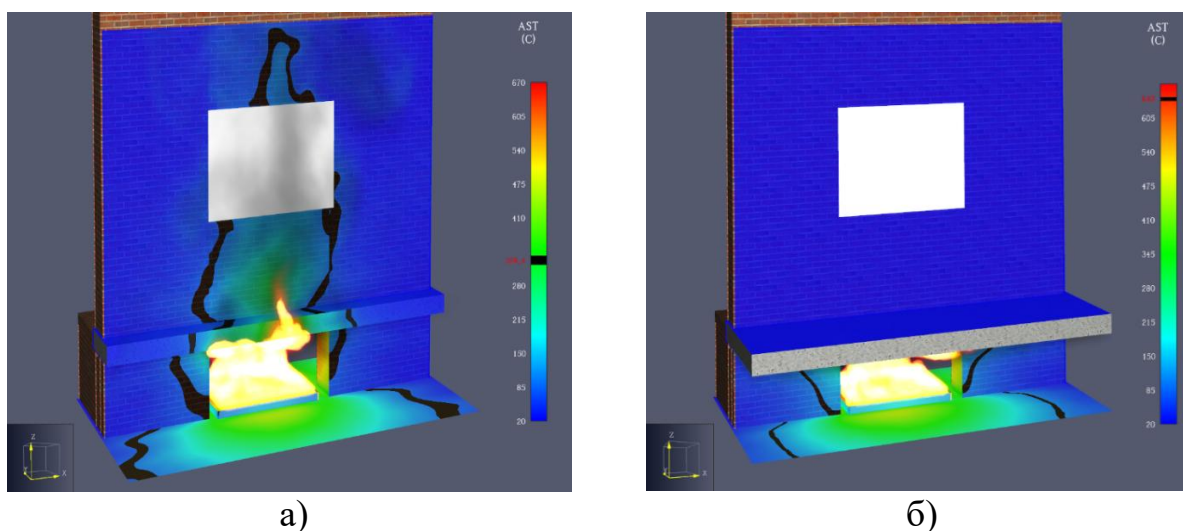


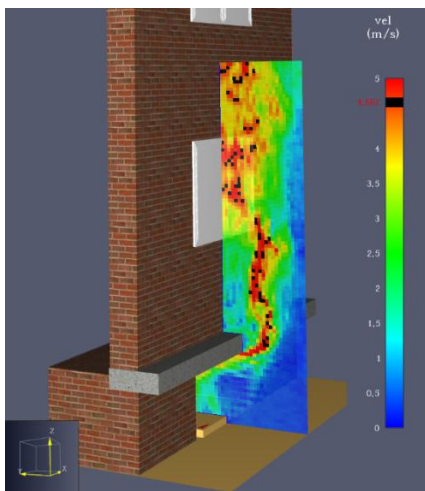
Рисунок 3.10 – Приклад температурних розподілів на поверхні фасаду, який обладнано протипожежним карнизом шириною 0,3 м (а) та 1,5 м (б) при значенні пожежної навантаги 780 МДж/м².

За результатом моделювання встановлено, що для фасаду, що не піддається впливу бокового вітру максимальне значення температури та фактична площа критичного прогріву на зовнішній поверхні фасаду при обладнанні прямими протипожежними карнизами складала:

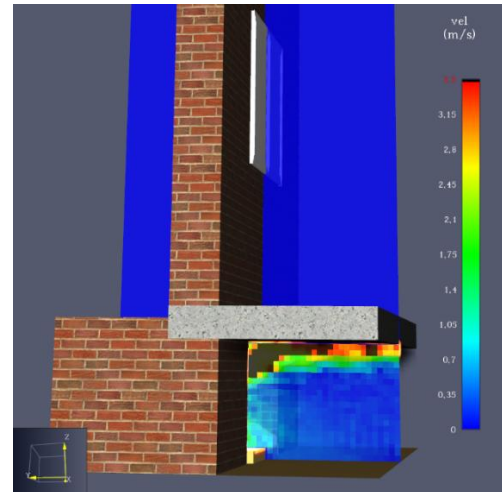
- ширина 0,3 м – 387 °С, 6,9 м² (±0,2 м²);
- ширина 0,5 м – 310 °С, 5,2 м² (±0,15 м²);
- ширина 0,75 м – 270 °С, 1,5 м² (±0,1 м²);
- ширина 1,0 м – 190 °С, критичний прогрів відсутній;
- ширина 1,25 м – 125 °С, критичний прогрів відсутній;
- ширина 1,5 м – 110 °С, критичний прогрів відсутній.

Отримані дані свідчать, що збільшення ширини карнизу від 0,3 м до 1,25 м є достатньо ефективним заходом для забезпечення зниження температурного впливу від дії пожежі на фасад поверху, який розташований над поверхом пожежі. При цьому, при застосуванні протипожежного карнизу шириною 1,0 м та більше критичний прогрів зовнішньої поверхні фасаду фактично відсутній. За результатом проведеного етапу моделювання визначено значення швидкості висхідного потоку під час пожежі, а також значення тиску

в зоні фасаду. Окремо варто відзначити, що для прямих протипожежних карнизів шириною від 0,3 м до 0,75 м спостерігається ефект повторного приєднання полум'я. На рисунку 3.11-3.12 наведено візуалізацію окремих експериментальних даних для фасаду обладнаного протипожежним карнизом шириною 0,3 м та 1,5 м при відсутності впливу бокового вітру.

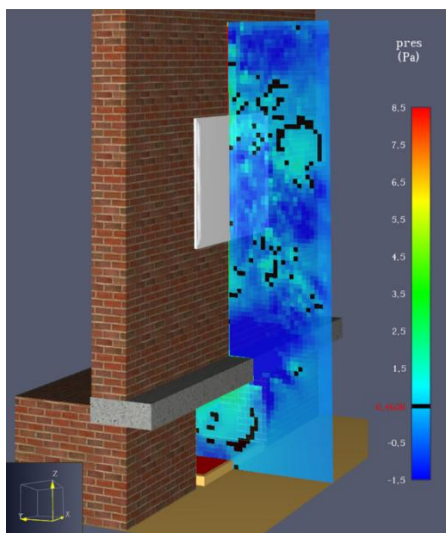


а)

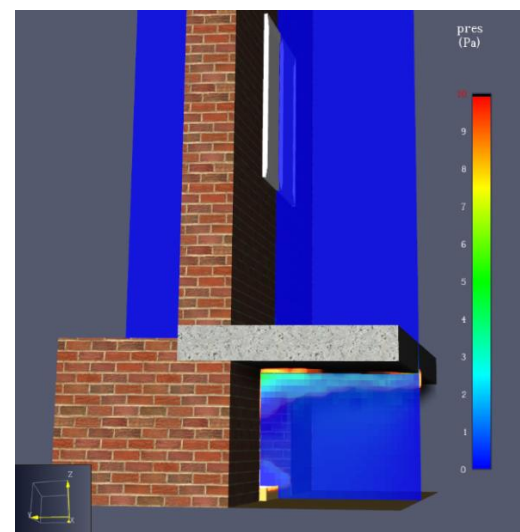


б)

Рисунок 3.11 – Швидкість висхідного потоку біля поверхні фасаду, який обладнано протипожежним карнизом шириною 0,3 м (а) та 1,5 м (б) без додаткового впливу вітру.



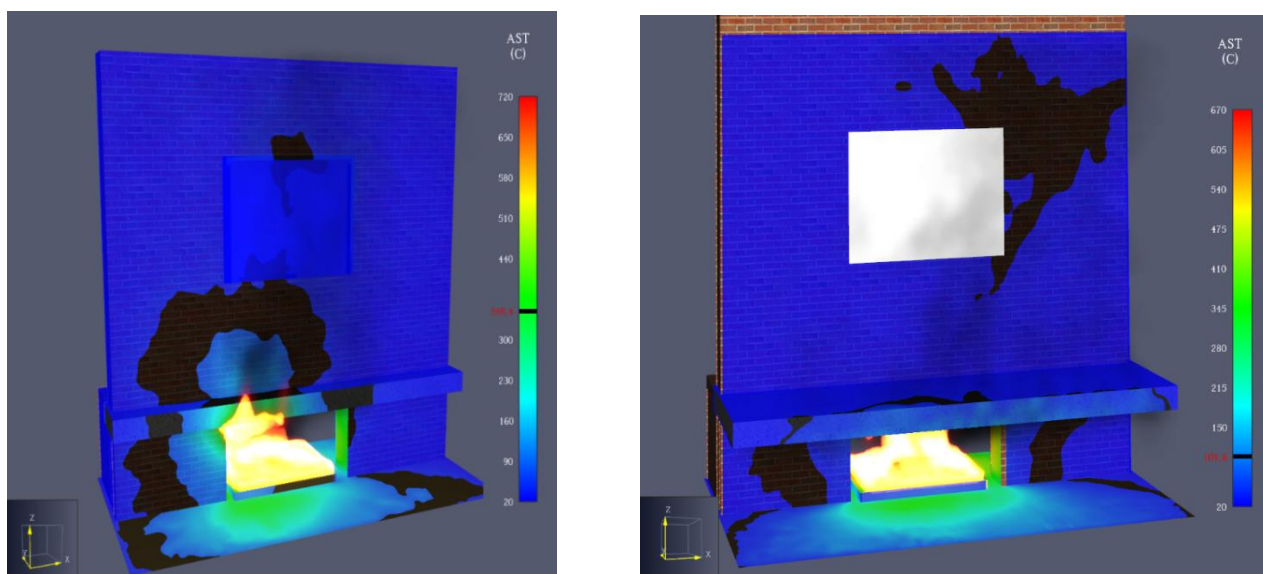
а)



б)

Рисунок 3.12 – Візуалізація тиску в зоні фасаду, який обладнано протипожежним карнизом шириною 0,3 м (а) та 1,5 м (б) без додаткового впливу вітру.

Результати щодо отриманих температурних розподілів на поверхні фасаду під час моделювання поширення пожежі при значенні пожежної навантаги 780 МДж/м^2 для моделі фасаду який обладнаний прямими протипожежними карнизами шириною 0,3 м та 1,5 м та при впливі бокового вітру зі швидкістю 5 м/с наведено на рисунку 3.13



а)

б)

Рисунок 3.13 – Приклад температурних розподілів на поверхні фасаду, який обладнано протипожежним карнизом шириною 0,3 м (а) та 1,5 м (б) під час впливу бокового вітру зі швидкістю 5 м/с.

Отримані дані свідчать, що вплив вітру суттєво не вплинув на максимальні значення температури в зоні досліджуваного фрагменту фасаду та площу критичного прогріву, а лише частково змінив характер температурних розподілів. За результатом наступного проведеного етапу обчислень визначено значення швидкості висхідного потоку під час пожежі, а також значення тиску в зоні фасаду. На рисунку 3.14-3.15 наведено візуалізацію окремих експериментальних даних для фасаду обладнаного протипожежним карнизом шириною 0,3 м та 1,5 м під час впливу бокового вітру зі швидкістю 5 м/с.

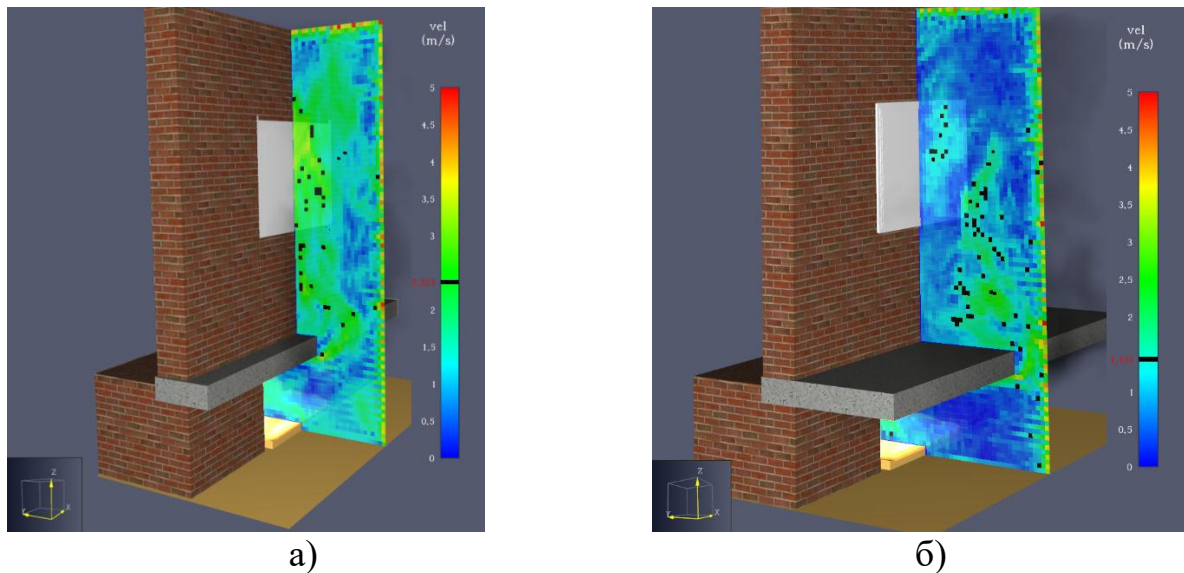


Рисунок 3.14 – Швидкість висхідного потоку біля поверхні фасаду, який обладнано протипожежним карнизом шириною 0,3 м (а) та 1,5 м (б) під час впливу бокового вітру зі швидкістю 5 м/с.

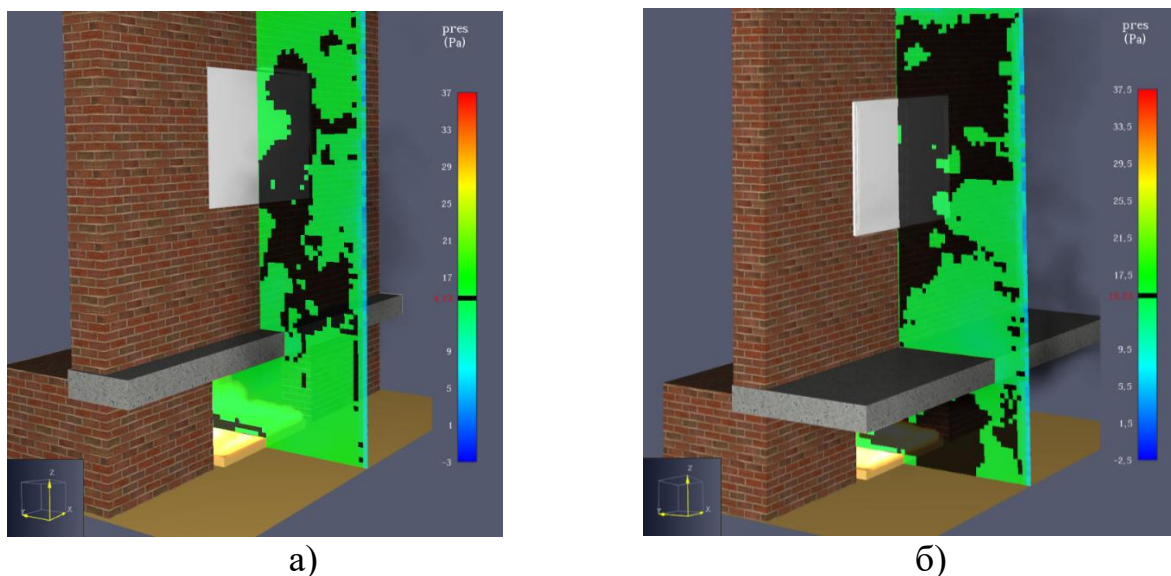


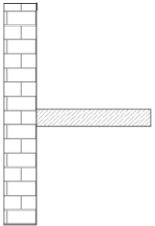
Рисунок 3.15 – Візуалізація тиску в зоні фасаду, який обладнано протипожежним карнизом шириною 0,3 м (а) та 1,5 м (б) під час впливу бокового вітру зі швидкістю 5 м/с.

За результатом даного етапу моделювання встановлено, що при наявності прямого протипожежного карнизу шириною 0,3 м середня швидкість висхідного потоку та значення тиску в зоні досліджуваного фрагменту фасаду у порівнянні із базовою моделлю фасаду суттєво не змінилося та знаходиться в

межах 10 %. Разом із тим, наявність протипожежного карнизу із шириною 1,5 м знизило швидкість висхідного теплового потоку фактично на 50 %, при цьому значення тиску фактично залишилося незмінним. Також для даного типу та ширини карнизу спостерігалось явище повторного приєднання полум'я до фасаду, що може бути одним із чинників поширення пожежі на вище розташовані поверхи будівлі. Реальний ефект обмеження пожежі за допомогою протипожежного карнизу прямої форми було зафіксовано при застосуванні ширини від 1,0 м та більше.

Узагальнюючі отримані дані встановлено, що фасад, який обладнано прямим протипожежним карнизом шириною від 0,3 м до 1,5 м є досить ефективним протипожежним засобом, що може забезпечити обмеження поширення зовнішньої пожежі як між протипожежними відсіками так і для покрівлі будівлі, проте не може захистити від явища повторного приєднання полум'я. Отримані результати щодо поширення пожежі по фасаді обладнаного прямим протипожежним карнизом із шириною від 0,3 м до 1,5 м наведено в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Дані, що характеризують процеси поширення пожежі на вище розташовані поверхи для фасаду обладнаного прямим протипожежним карнизом

Тип протипожежного карнизу	Ширина карнизу, м	Максимальне значення температури зафіксоване в зоні фасаду, °С, (наявність ефекту повторного приєднання полум'я, «+»)	Площа критичного прогріву, % (±5 %)	Висота зони критичного значення температури, м (±0,2 м)	Середня швидкість висхідного потоку, м/с (±0,3 м/с)	Значення тиску в зоні фасаду, Па (±10 %)
Прямий 	0,3	360/ 387 °С (+)	69/72	6,0/5,8	3,4/4,7	4,7/0,4
	0,5	300/ 310 °С (+)	55/52	4,7/4,4	2,3/4,5	6,3/1,5
	0,75	260/ 270 °С (+)	17/15	4,2/4,0	2,1/4,2	8,1/2,2
	1,0	180/ 190 °С (+)	-	-	1,8/3,9	11,9/5,0
	1,25	120/ 125 °С (+)	-	-	1,4/3,7	14,5/8,5
	1,5	110/ 110 °С	-	-	1,4/3,6	15,2/9,8

Наступним етапом досліджень стало визначення впливу протипожежного карнизу з формою правильного багатогранника, який виступає на ширину 0,3 м, 0,5 м, 0,75 м, 1,0 м, 1,25 м та 1,5 м на процесі поширення зовнішньої пожежі при значенні пожежної навантаги пожежі 780 МДж/м². При цьому, для відтворення пропорційності карнизу його загальну товщину збільшено з 0,3 м до 0,5 м. На рисунку 3.16 наведено візуалізацію створеної моделі.

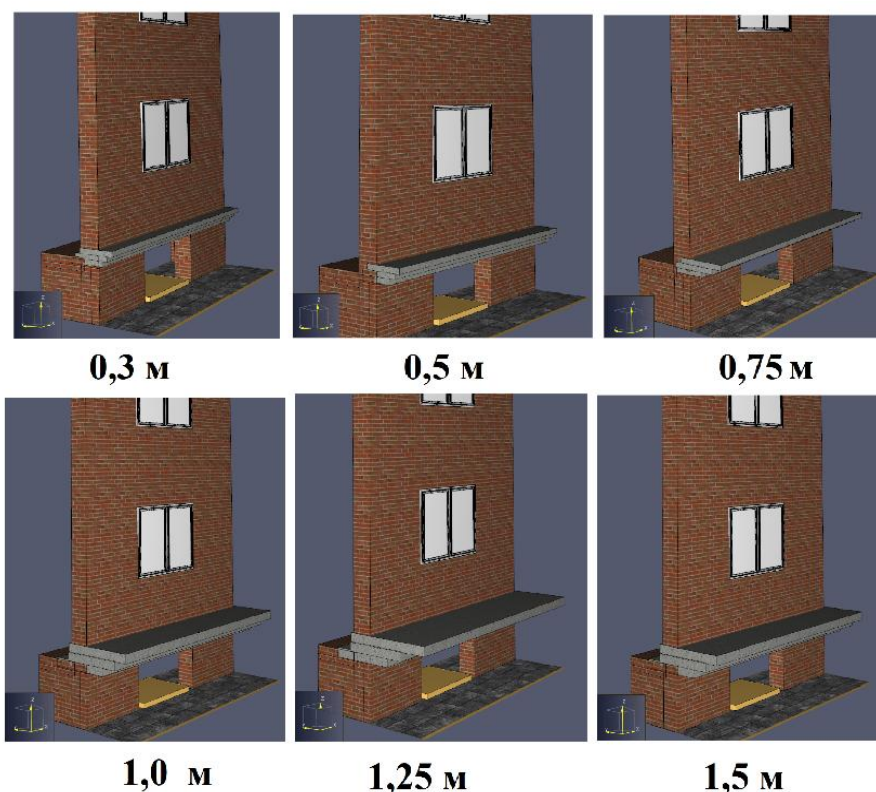


Рисунок 3.16 – Зовнішній вигляд створених комп'ютерних моделей багатогранних прямих протипожежних карнизів шириною від 0,3 м до 1,5 м.

За результатом даного етапу моделювання, отримані дані, щодо температурних розподілів на поверхні фасаду, який обладнано протипожежним карнизом з наявністю багатогранних виступів загального прямокутного профілю шириною від 0,3 м до 1,5 м при пожежній навантазі 780 МДж/м² без впливу вітру та при наявності бокового вітру зі швидкістю 5 м/с. На рисунку 3.17 наведено приклад зміни характеристик температурних розподілів на поверхні фасаду при застосуванні визначеного типу протипожежного карнизу шириною 0,3 м та 1,5 м.

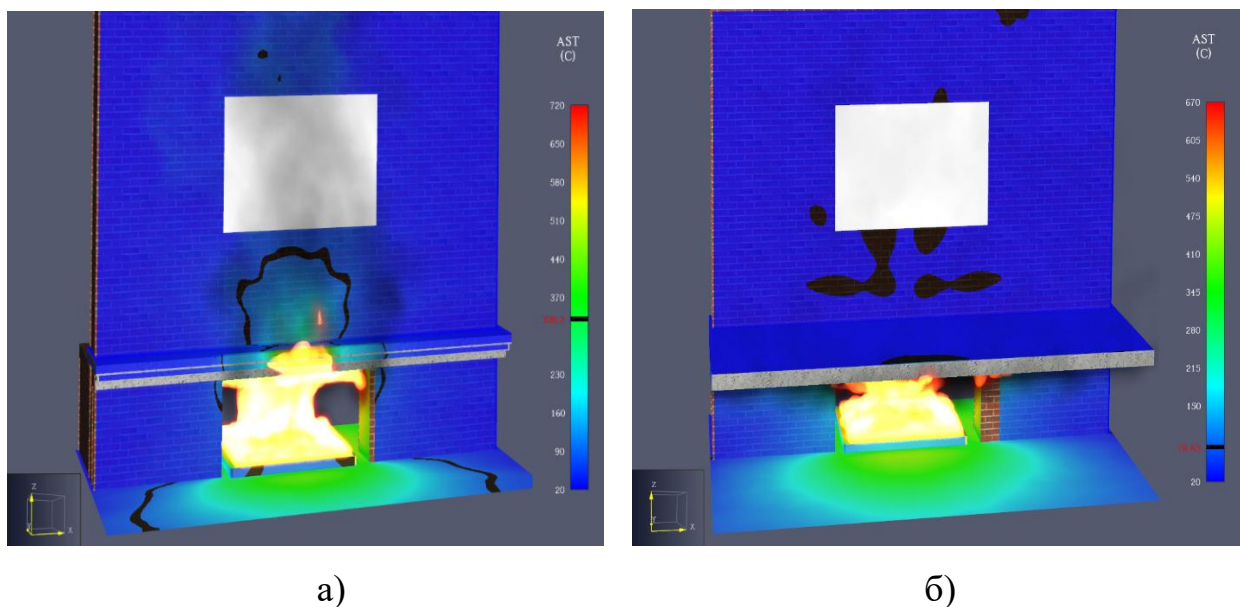


Рисунок 3.17 – Візуалізація температурних розподілів на фасаді, який захищений протипожежним карнизом багатогранної форми шириною 0,3 м (а) та 1,5 м (б).

Максимальне зафіксоване значення температури на поверхні фасаду при застосуванні протипожежного карнизу шириною 0,3 м багатогранної форми без вітрового впливу за даних умов моделювання склало до 330 °С, а при наявності вітрового впливу в 5 м/с склало 311 °С. Для протипожежного карнизу шириною 1,5 м багатогранної форми без вітрового впливу за даних умов моделювання склало до 80 °С, а при наявності вітрового впливу в 5 м/с склало 311 °С. При цьому встановлено, що при ширині даного типу карнизу більше 0,5 м ефект повторного приєднання полум'я до фасаду не спостерігався. Максимальна площа критичного прогріву, який спостерігався при застосуванні даного типу протипожежного карнизу шириною 0,3 м не перевищив 18 % відносно всієї досліджуваної площі фасаду, що фактично в 3 рази ефективніше ніж застосування протипожежного карнизу прямої форми із аналогічною шириною. На рисунку 3.18 наведено візуалізацію температурних розподілів на фасаді, який захищений протипожежним карнизом багатогранної форми при впливі бокового вітру зі швидкістю 5 м/с.

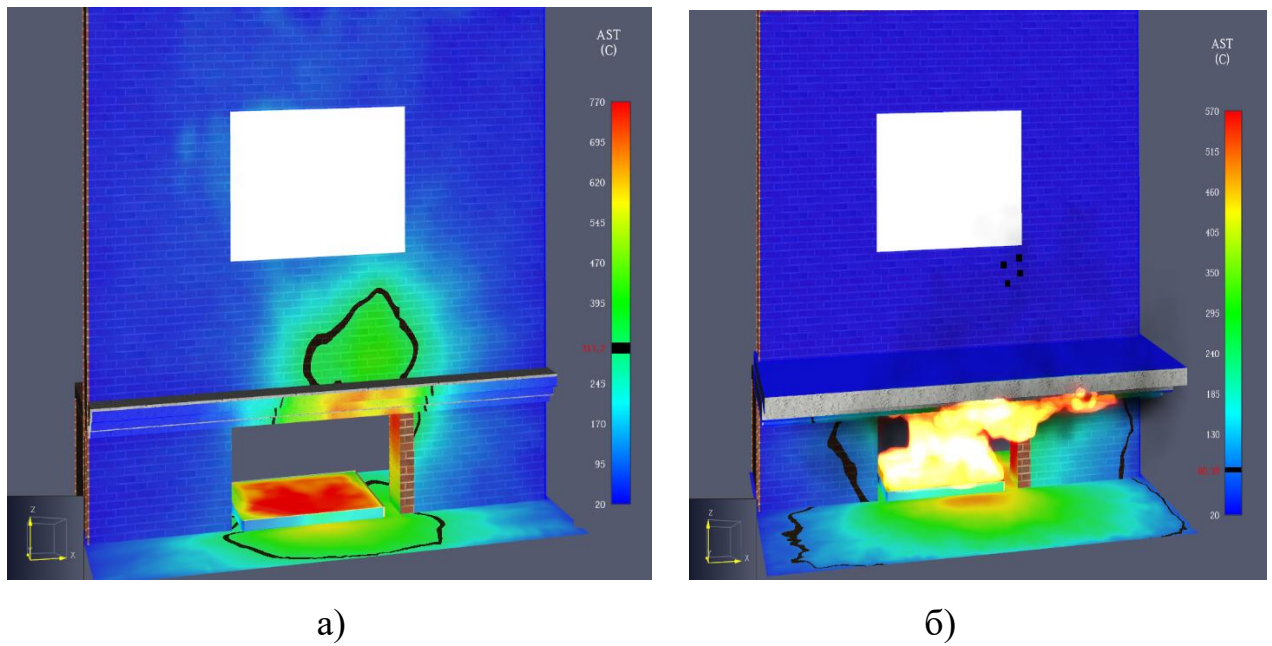


Рисунок 3.18 – Візуалізація температурних розподілів на фасаді, який захищений протипожежним карнизом багатогранної форми при впливі бокового вітру.

За результатом даного етапу моделювання встановлено, що даний тип карнизу дозволив зменшити площу критичного прогріву у порівнянні із протипожежним карнизом прямої форми фактично в 3,4 рази, а також дозволив знизити висоту зони утворення плями критичного значення температури на поверхні досліджуваного фрагменту фасаду. При ширині 1,5 м багатогранний протипожежний карниз зміг знизити максимальне значення температури на 20% у порівнянні із прямим протипожежним карнизом з аналогічною шириною виступу. Окрім цього, за даним етапом дослідження визначено значення середньої швидкості висхідного потоку та значення тиску в зоні фасаду від дії пожежі при наявності впливу бокового вітру та без нього. На рисунку 3.19 наведено візуалізацію швидкості висхідного потоку при застосуванні визначеного типу протипожежного карнизу шириною 0,3 м та 1,5 м при відсутності впливу вітру.

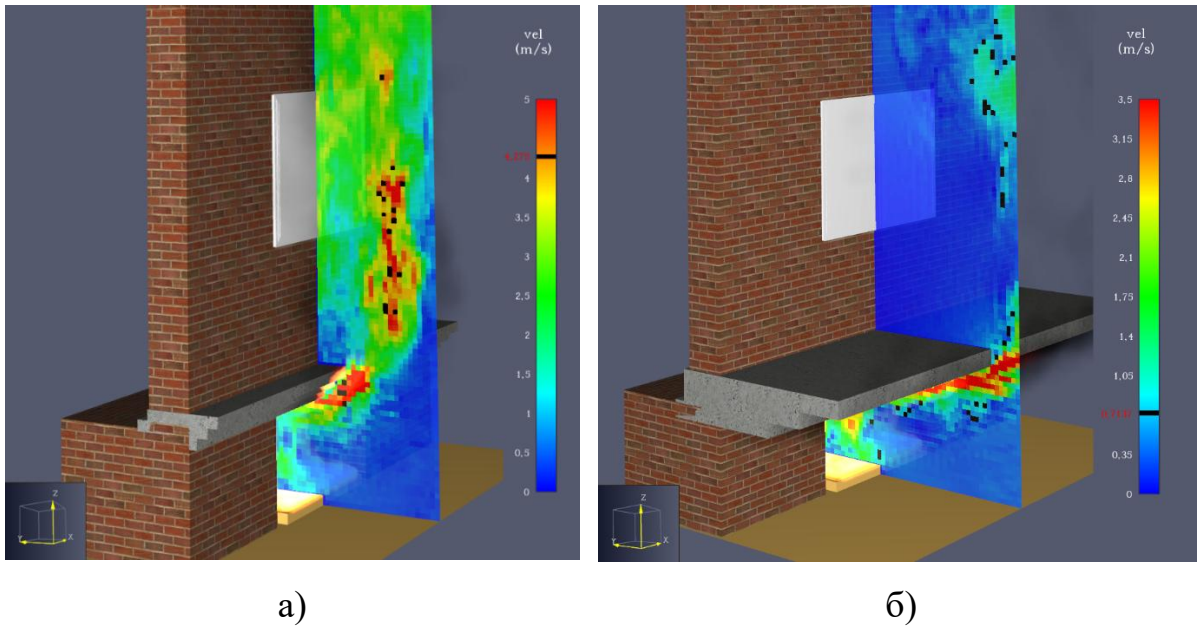


Рисунок 3.19 – Швидкість висхідного потоку від пожежі при застосуванні протипожежного карнизу шириною 0,3 м (а) та 1,5 м (б) при відсутності впливу вітру.

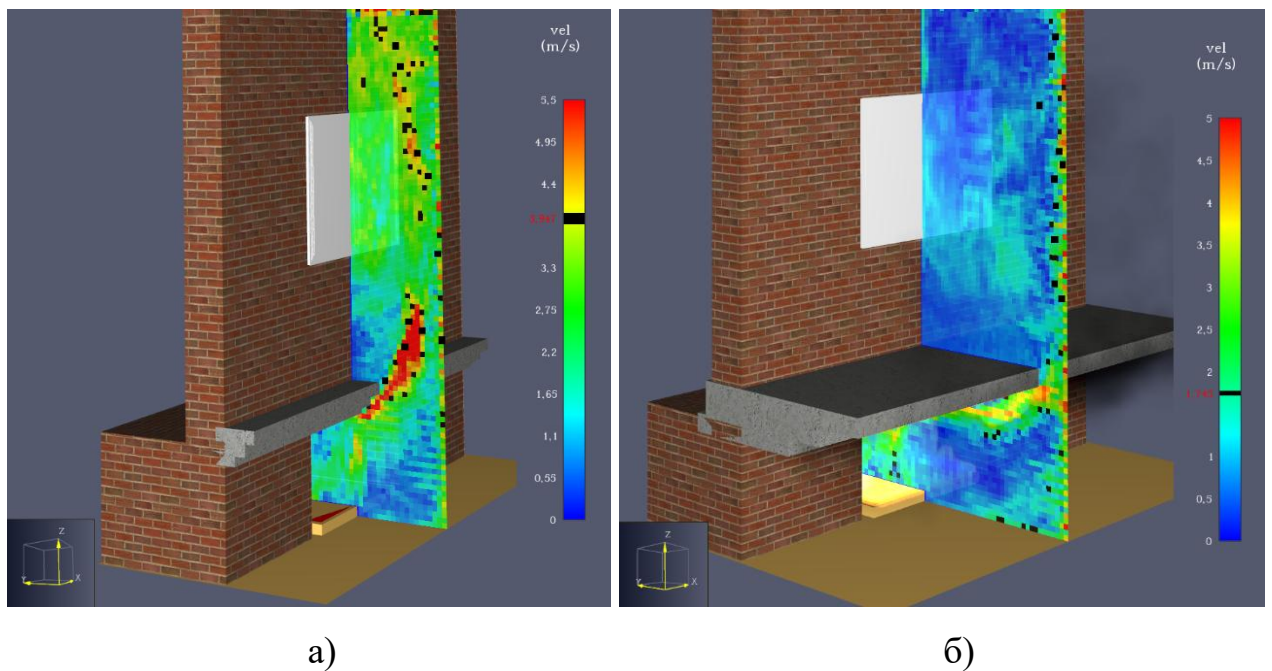
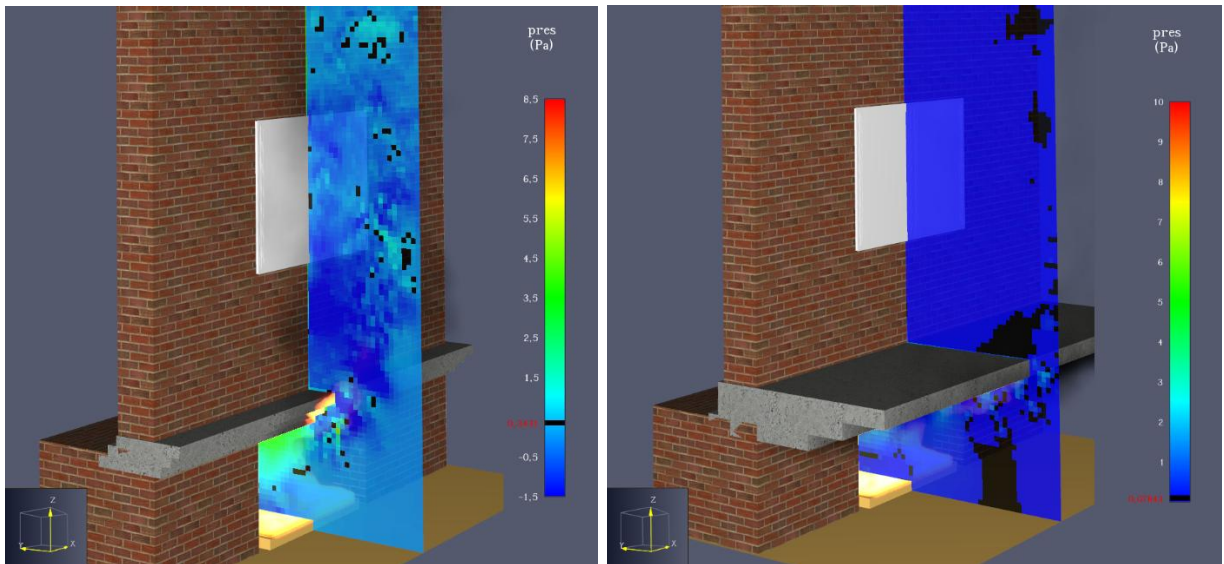


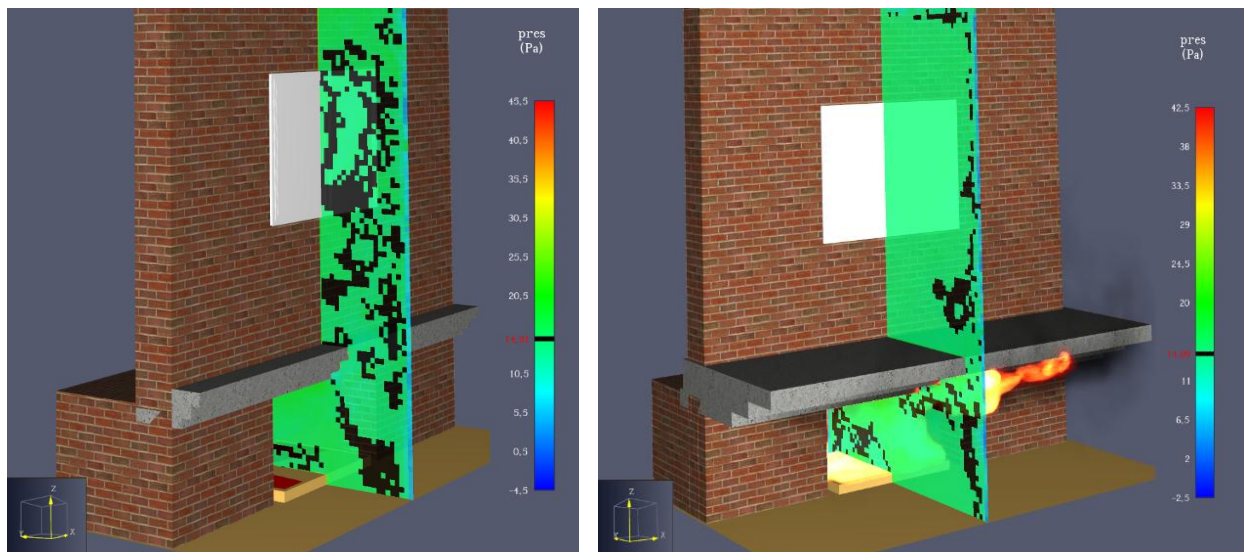
Рисунок 3.20 – Швидкість висхідного потоку при застосуванні протипожежного карнизу шириною 0,3 м (а) та 1,5 м (б) при впливі бокового вітру зі швидкістю 5 м/с.



а)

б)

Рисунок 3.21 – Значення тиску в зоні фасаду від дії пожежі при застосуванні протипожежного карнизу шириною 0,3 м (а) та 1,5 м (б) при відсутності впливу вітру.



а)

б)

Рисунок 3.22 – Значення тиску в зоні фасаду від дії пожежі при застосуванні протипожежного карнизу шириною 0,3 м (а) та 1,5 м (б) при впливі бокового вітру зі швидкістю 5 м/с.

За результатом проведених досліджень виявлено, що наявність багатогранного протипожежного карнизу у порівнянні із протипожежним карнизом простої прямокутної форми дозволяє створити траєкторію полум'я,

при якій значення тиску (p) та швидкості (u) значно зменшується, при цьому не досягає нульового значення у пожежонебезпечній зоні фасаду. Забезпечення даних умов та відведення полум'я у зовнішній простір від площини фасаду зменшує температурний вплив на зовнішній поверхні фасадної конструкції, що є однією із головних передумов збереження її цілісності та обмеження подальшого поширення пожежі на верхні поверхи.

Таким чином отримані дані свідчать, що в разі застосування у якості фасадних протипожежних перешкод (протипожежних карнизів) прямокутних виступів або багатогранних виступів загального прямокутного профілю, можливо створити зону найменшої швидкості від початкового імпульсу та максимального тиску поза зоною фасадної площини та уникнути утворення точки повторного приєднання полум'я в зоні самого фасаду. На рисунку 3.23 наведено приклад ефективності протипожежного карнизу багатогранної форми, що дозволяє створити умови найменшої швидкості (до 0,5 м/с) та тиску (до 0,3 Па) від дії пожежі поза зоною фасадної площини, що призводить до відсутності утворення точки повторного приєднання полум'я в зоні самого фасаду у порівнянні із протипожежним карнизом прямокутної форми.

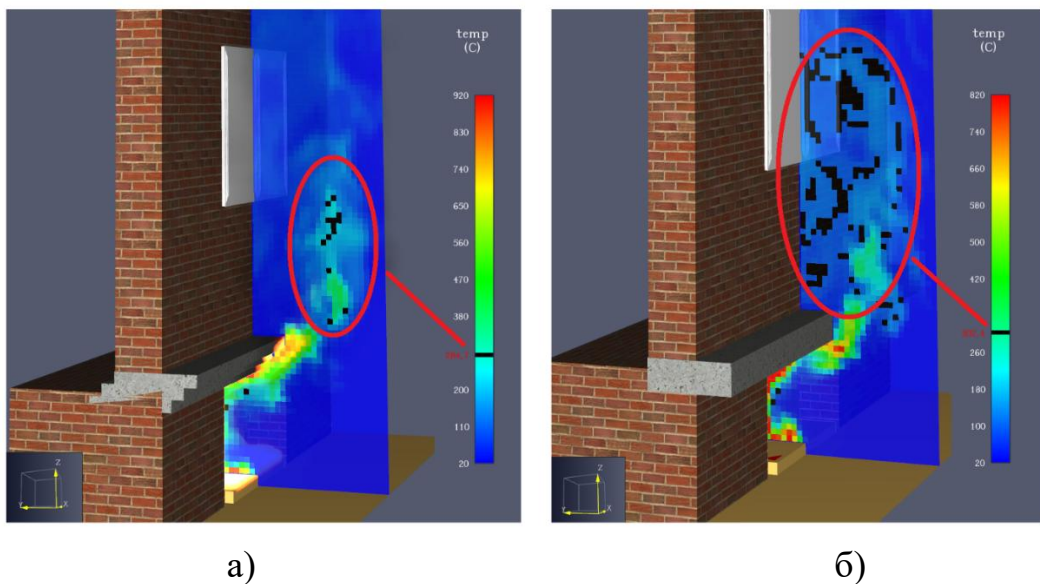
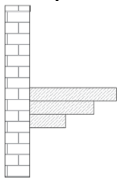


Рисунок 3.23 – Порівняння характеру поширення висхідного потоку від дії пожежі для багатокутного протипожежного карнизу (а) та протипожежного карнизу прямої форми (б) шириною 0,3 м кожен.

Отримані та систематизовані результати досліджень щодо поширення пожежі по фасаді обладнаного протипожежним карнизом багатогранної форми із шириною від 0,3 м до 1,5 м наведено в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Дані, що характеризують процеси поширення пожежі на вище розташовані поверхи для фасаду, який обладнано протипожежним карнизом багатогранної форми

Тип протипожежного карнизу	Ширина карнизу, м	Максимальне значення температури зафіксоване в зоні фасаду °С, (наявність ефекту повторного приєднання полум'я, «+»)	Площа критичного прогріву, % (±5 %)	Висота зони критичного значення температури, м (±0,2 м)	Середня швидкість висхідного потоку, м/с (±0,3 м/с)	Значення тиску в зоні фасаду, Па (±10 %)
З формою багатогранника 	0,3	311/ 330	18/22	4,2/4,2	3,9/4,3	14,9/0,34
	0,5	200/220	-	-	2,1/2,2	8,2/0,2
	0,75	160/170	-	-	1,7/1,8	6,0/0,16
	1,0	140/150	-	-	1,7/1,8	5,0/0,12
	1,25	90/110	-	-	1,6/1,6	5,0/0,12
	1,5	75/80	-	-	1,5/1,5	4,0/0,06

Наступним етапом комп'ютерного моделювання та досліджень визначення впливу протипожежного карнизу з формою трапеції, який виступає на ширину 0,3 м, 0,5 м, 0,75 м, 1,0 м, 1,25 м та 1,5 м на процеси обмеження поширення зовнішньої пожежі при значенні пожежної навантаги пожежі 780 МДж/м² в середині приміщення де вона моделюється. Загальна товщина конструкції протипожежного карнизу в основі його кріплення біля зони фасаду будівлі склала 0,4 м, а на зовнішній його частині становила 0,1 м. На рисунку 3.24 наведено візуалізацію створеної моделі досліджуваних типів протипожежного карнизу.

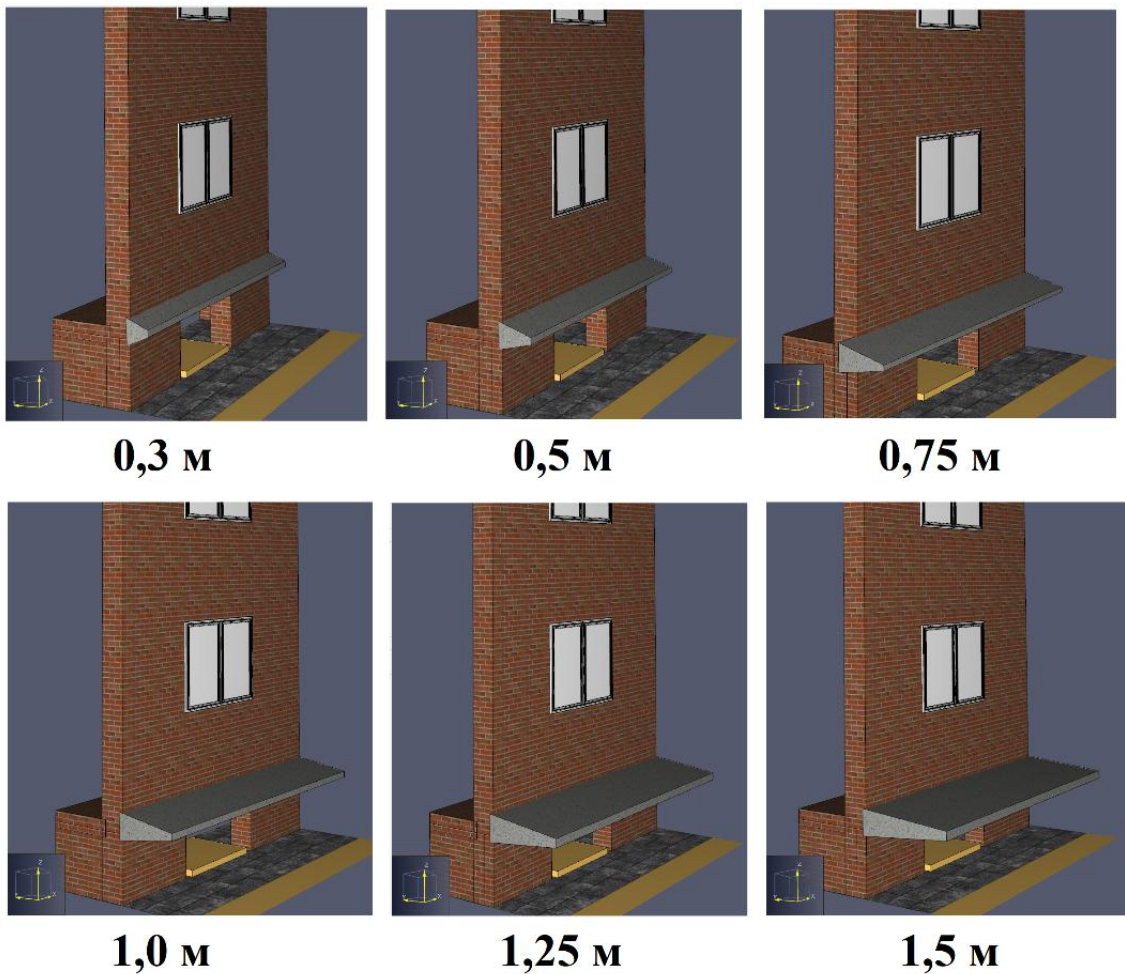


Рисунок 3.24 – Зовнішній вигляд створених комп'ютерних моделей протипожежних карнизів з формою трапеції шириною від 0,3 м до 1,5 м.

За результатом проведеного комп'ютерного моделювання розрахункової пожежі, отримані експериментальні дані, щодо температурних розподілів на поверхні фасаду, який обладнано протипожежним карнизом з формою трапеції із шириною виступу від 0,3 м до 1,5 м при значенні пожежної навантаги 780 МДж/м² без впливу вітру, а також при наявності бокового вітру зі швидкістю 5 м/с. На рисунку 3.25 наведено приклад зміни характеристик температурних розподілів на поверхні фасаду, а також граничні температурні значення (чорний контур) при застосуванні визначеного типу протипожежного карнизу шириною 0,3 м та 1,5 м.

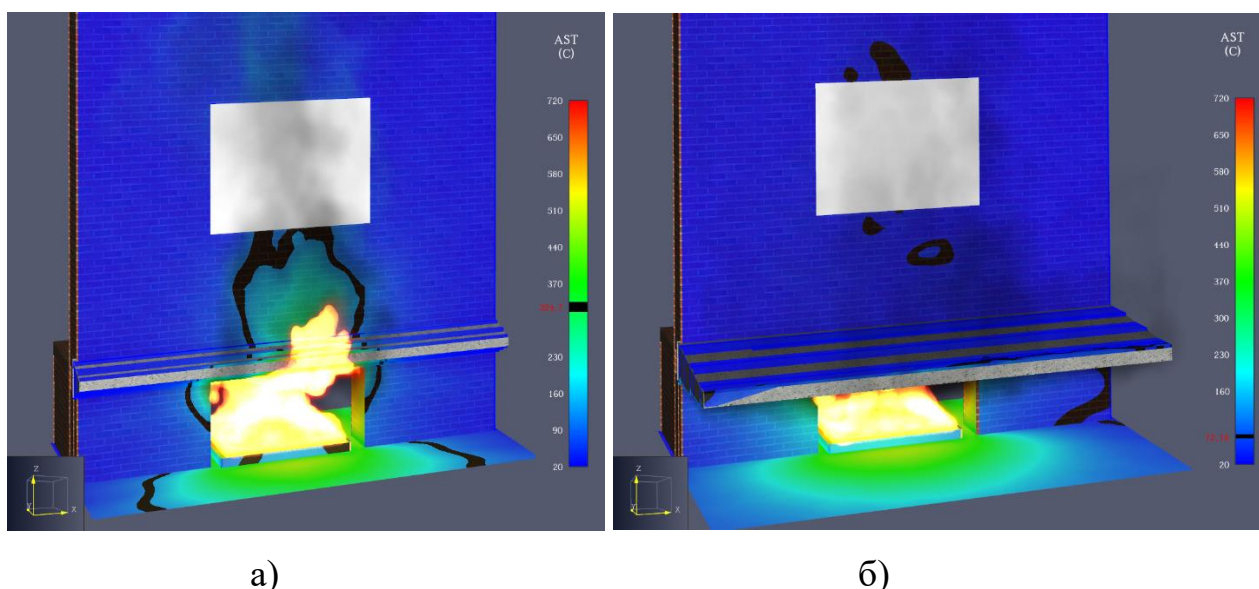


Рисунок 3.25 – Візуалізація температурних розподілів на фасаді, який захищений протипожежним карнизом з формою трапеції шириною 0,3 м (а) та 1,5 м (б) без впливу бокового вітру.

Максимальне зафіксоване значення температури на поверхні фасаду при застосуванні протипожежного карнизу з формою трапеції та шириною виступу 0,3 м без вітрового впливу за даних умов моделювання склало до 325 °С, а при наявності вітрового впливу в 5 м/с склало 316 °С. Для протипожежного карнизу шириною 1,5 м з формою трапеції та без вітрового впливу за даних умов моделювання склало до 72 °С, а при наявності вітрового впливу в 5 м/с склало 58 °С. Ефект повторного приєднання полум'я до фасаду при ширині карнизу 0,3 м відбувається в зоні 3,9-4,3 м, що фактично повторює результати моделювання для багатогранного протипожежного карнизу із шириною 0,3 м. При цьому встановлено, що при ширині протипожежного карнизу у формі трапеції більше 0,5 м ефекту повторного приєднання полум'я до фасаду вдається запобігти. Максимальна площа критичного прогріву, який спостерігався при застосуванні даного типу протипожежного карнизу шириною 0,3 м не перевищила 17 % від загальної площі фрагменту досліджуваного фасаду, що для даного етапу моделювання є найкращим показником ефективності у порівнянні із іншими досліджуваними карнизами із аналогічною шириною виступу. На рисунку 3.26

наведено візуалізацію температурних розподілів на фасаді, який захищений протипожежним карнизом багатогранної форми при впливі бокового вітру зі швидкістю 5 м/с.

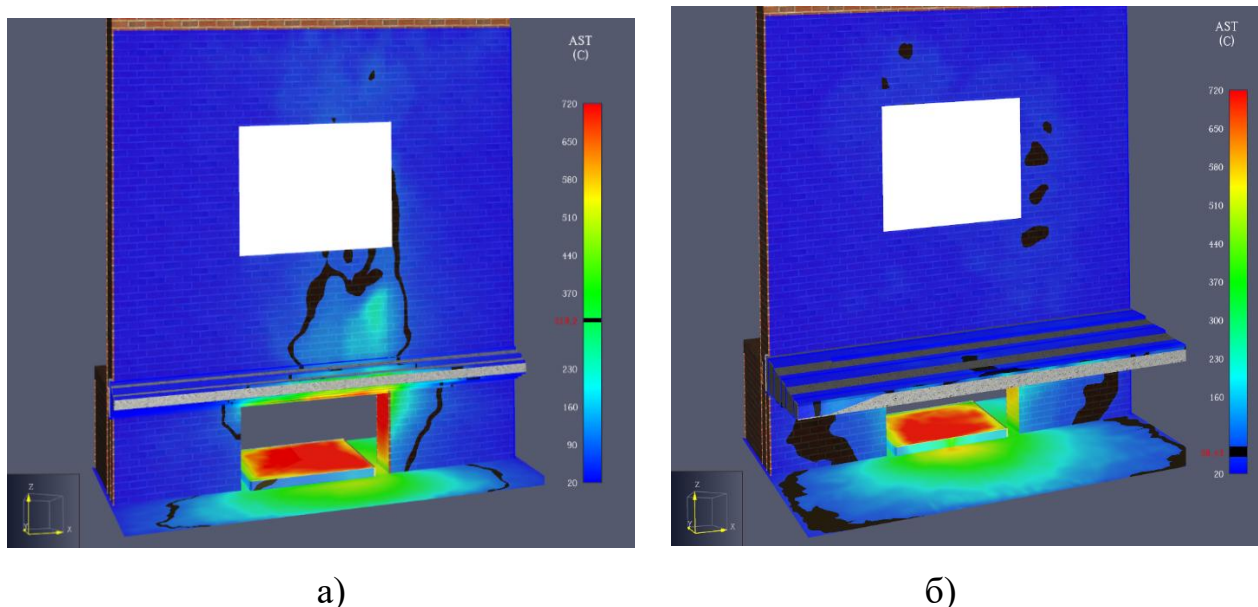
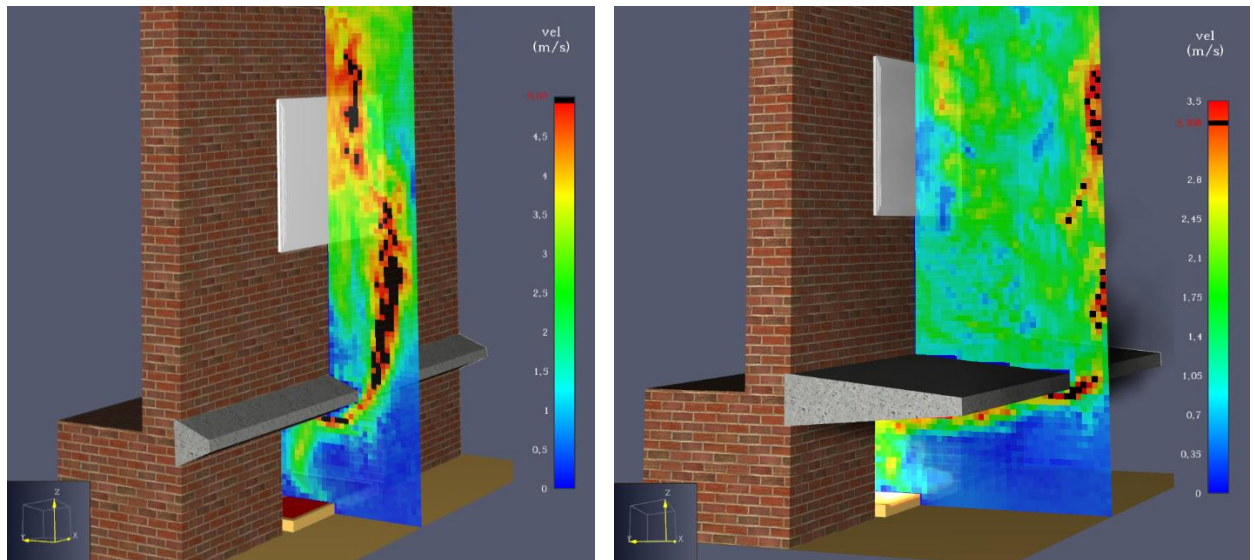


Рисунок 3.26 – Візуалізація температурних розподілів на фасаді, який захищений протипожежним карнизом з формою трапеції шириною виступу 0,3 м (а) та 1,5 м (б) при впливі бокового вітру.

За результатом даного етапу експериментального моделювання встановлено, що даний тип протипожежного карнизу дозволив зменшити площу критичного прогріву фасаду у порівнянні із протипожежним карнизом прямої форми фактично в 3,5 рази. При ширині виступу у 1,5 м від площини фасаду протипожежний карниз у формі трапеції зміг знизити максимальне значення температури на 23% у порівнянні із протипожежним карнизом прямої форми з аналогічною шириною виступу.

Наступний етап експериментальних досліджень дозволив визначити значення середньої швидкості висхідного потоку та значення тиску в зоні фасаду від дії пожежі при наявності впливу бокового вітру та без нього. На рисунку 3.27 наведено візуалізацію швидкості висхідного потоку при застосуванні визначеного типу протипожежного карнизу шириною 0,3 м та

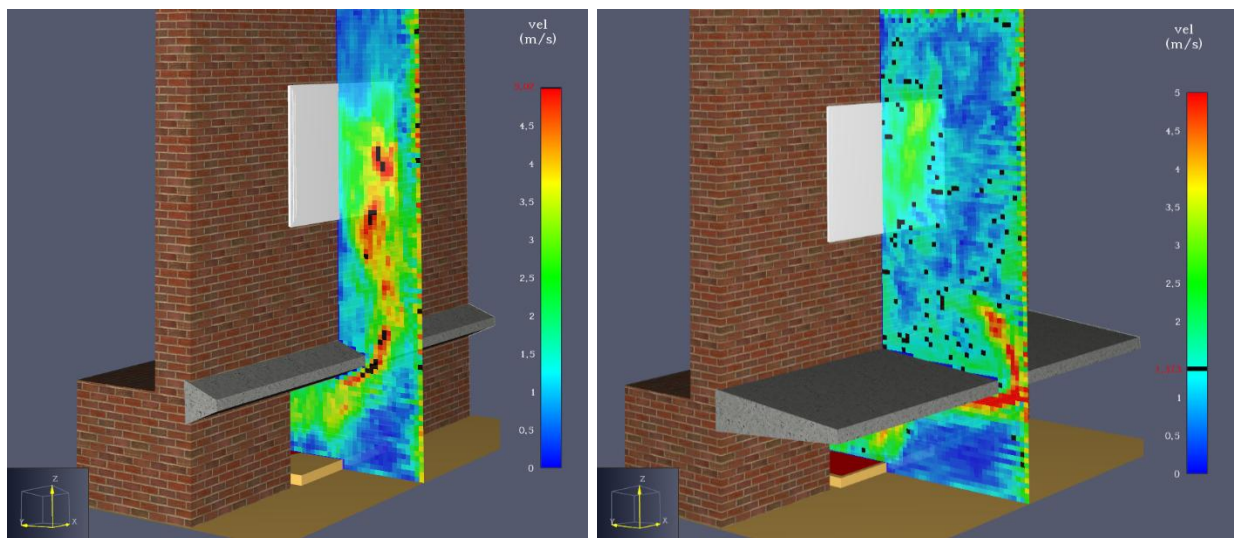
1,5 м при відсутності впливу вітру.



а)

б)

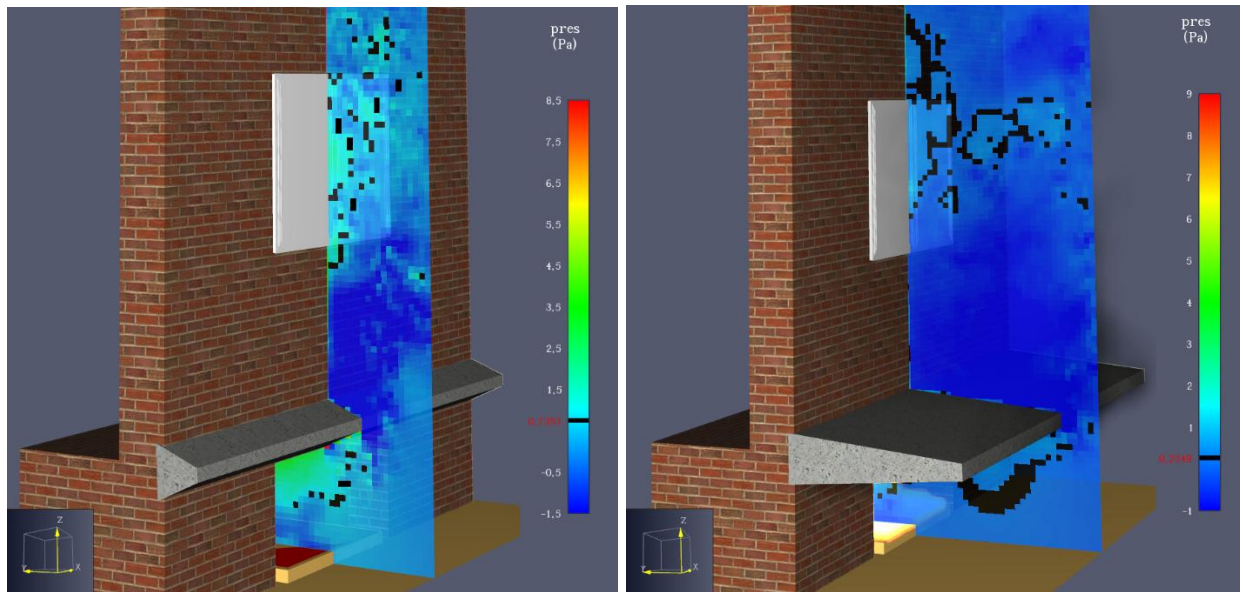
Рисунок 3.27 – Швидкість висхідного потоку при застосуванні протипожежного карнизу шириною 0,3 м (а) та 1,5 м (б) при відсутності впливу вітру.



а)

б)

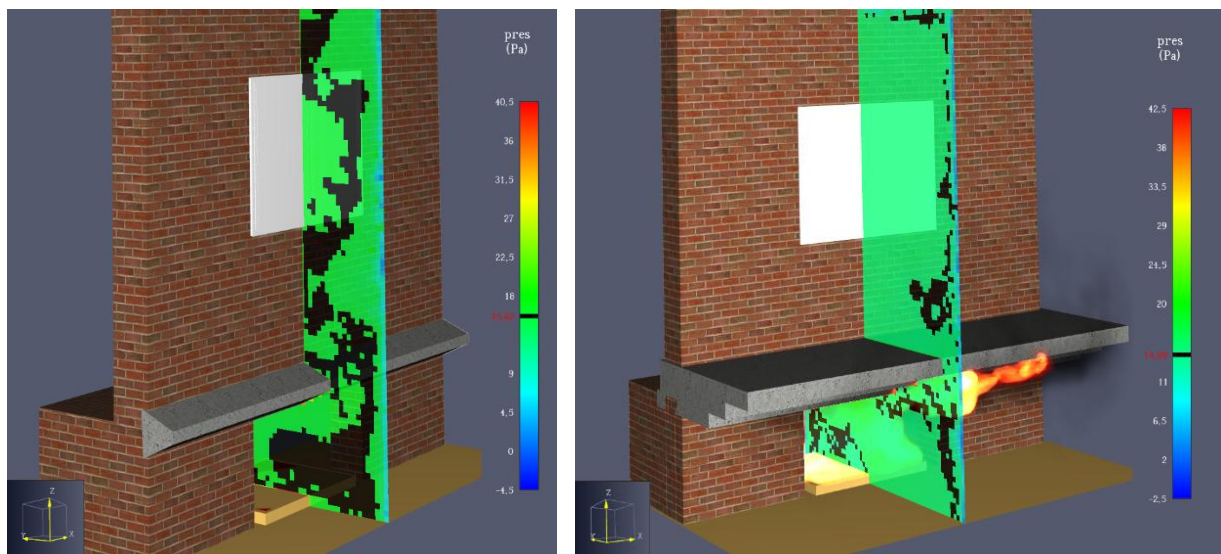
Рисунок 3.28 – Швидкість висхідного потоку при застосуванні протипожежного карнизу шириною 0,3 м (а) та 1,5 м (б) при впливі бокового вітру зі швидкістю 5 м/с.



а)

б)

Рисунок 3.29 – Значення тиску в зоні фасаду від дії пожежі при застосуванні протипожежного карнизу шириною 0,3 м (а) та 1,5 м (б) при відсутності впливу вітру.



а)

б)

Рисунок 3.30 – Значення тиску в зоні фасаду від дії пожежі при застосуванні протипожежного карнизу шириною 0,3 м (а) та 1,5 м (б) при впливі бокового вітру зі швидкістю 5 м/с.

За результатом проведеного етапу досліджень, щодо дослідження впливу

конструктивних параметрів протипожежного карнизу з формою трапеції на процеси поширення пожежі на вище розташовану зовнішню площину фасаду встановлено, що даний тип протипожежної перешкоди дозволяє зменшити загальну площу критичного прогріву до 10 % у порівнянні з іншими типами протипожежних перешкод, а також більш ефективно зменшує максимальне значення температури на поверхні фасаду.

На рисунку 3.31 наведено приклад відносної ефективності протипожежного карнизу з формою трапеції у порівнянні з протипожежним карнизом багатогранної форми та прямокутної форми, який дозволяє створити умови найменшого температурного впливу на фасад та забезпечує відсутність утворення точки повторного приєднання полум'я в зоні самого фасаду, а також частково відвести висхідний потік від зони фасадної площини.

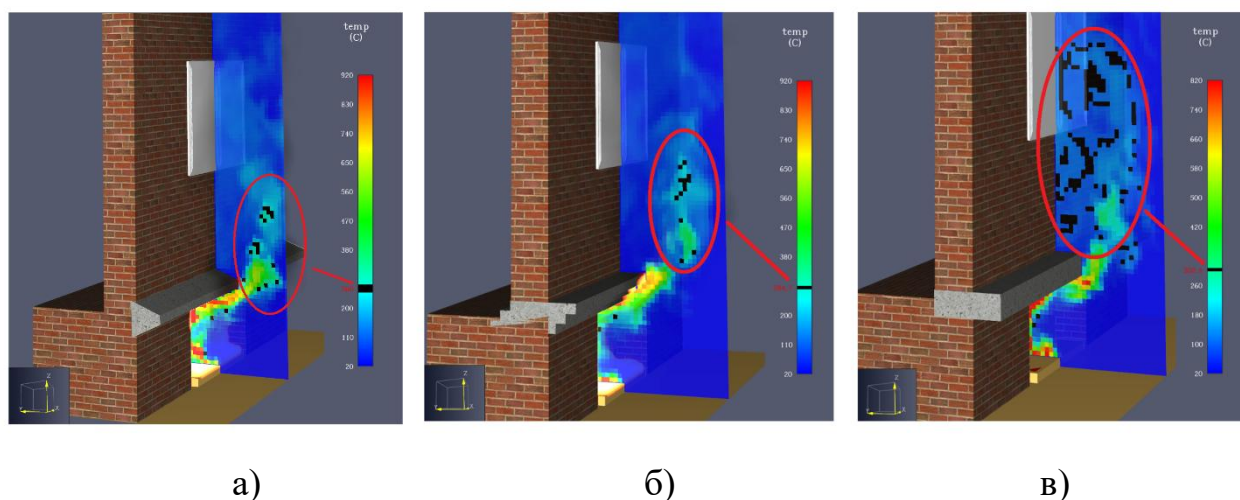
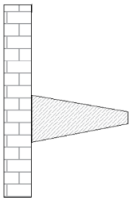


Рисунок 3.31 – Порівняння характеру поширення висхідного потоку від дії пожежі для протипожежного карнизу у формі трапеції (а), з багатогранною формою (б) та протипожежного карнизу прямої форми (в) шириною 0,3 м.

За результатом проведених розрахункових дій та досліджень, систематизовані результати щодо поширення пожежі по фасаді обладнаного протипожежним карнизом з формою трапеції із шириною від 0,3 м до 1,5 м наведено в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 – Дані, що характеризують процеси поширення пожежі на вище розташовані поверхи для фасаду, який обладнано протипожежним карнизом з формою трапеції

Тип протипожежного карнизу	Ширина карнизу, м	Максимальне значення температури зафіксоване в зоні фасаду °С, (наявність ефекту повторного приєднання полум'я, «+»)	Площа критичного прогріву, % (±5 %)	Висота зони критичного значення температур и, м (±0,2 м)	Середня швидкість висхідного потоку, м/с (±0,3 м/с)	Значення тиску в зоні фасаду, Па (±10 %)
З формою трапеції 	0,3	316/ 325 (+)	16/17	1,8/1,7	5,1/5,1	15,6/0,74
	0,5	220/230	-	-	3,5/4,5	15,2/0,69
	0,75	205/210	-	-	2,9/4,2	14,9/0,53
	1,0	160/170	-	-	2,2/3,9	14,7/0,38
	1,25	115/110	-	-	1,9/3,5	14,5/0,32
	1,5	54/72	-	-	1,3/3,4	14,1/0,25

Дослідження протипожежного карнизу з формою трапеції показало, що наявність нижньої грані в протипожежній перешкоді, яка знаходиться під кутом відносно горизонталі підвищує середню швидкість висхідного потоку та як наслідок позитивно впливає на запобігання явищу повторного приєднання полум'я до площини вище розташованого фасаду. Таким чином, наступним етапом досліджень є визначення впливу фасадних протипожежних карнизів із заокругленою формою нижньої грані. Під час даного етапу моделювання розглядатимуться протипожежні карнизи із формою «вінглету» та протипожежні карнизи із заокругленою формою виступу

Таким чином, на даному етапі експериментальних досліджень було розроблено модель протипожежного карнизу з формою «вінглету», який виступає на ширину 0,3 м, 0,5 м, 0,75 м, 1,0 м, 1,25 м та 1,5 м. Оцінювання ефективності обмеження поширення зовнішньої пожежі при значенні її пожежної навантаги в 780 МДж/м² в середині приміщення відбувалося за визначеною методикою. Геометричні параметри карнизу склали - товщина

карнизу в основі його кріплення біля зони фасаду склала 0,4 м, кут виступаючої частини 15° , кут заокругленої частини 35° . На рисунку 3.32 наведено візуалізацію створеної моделі досліджуваних типів протипожежного карнизу.

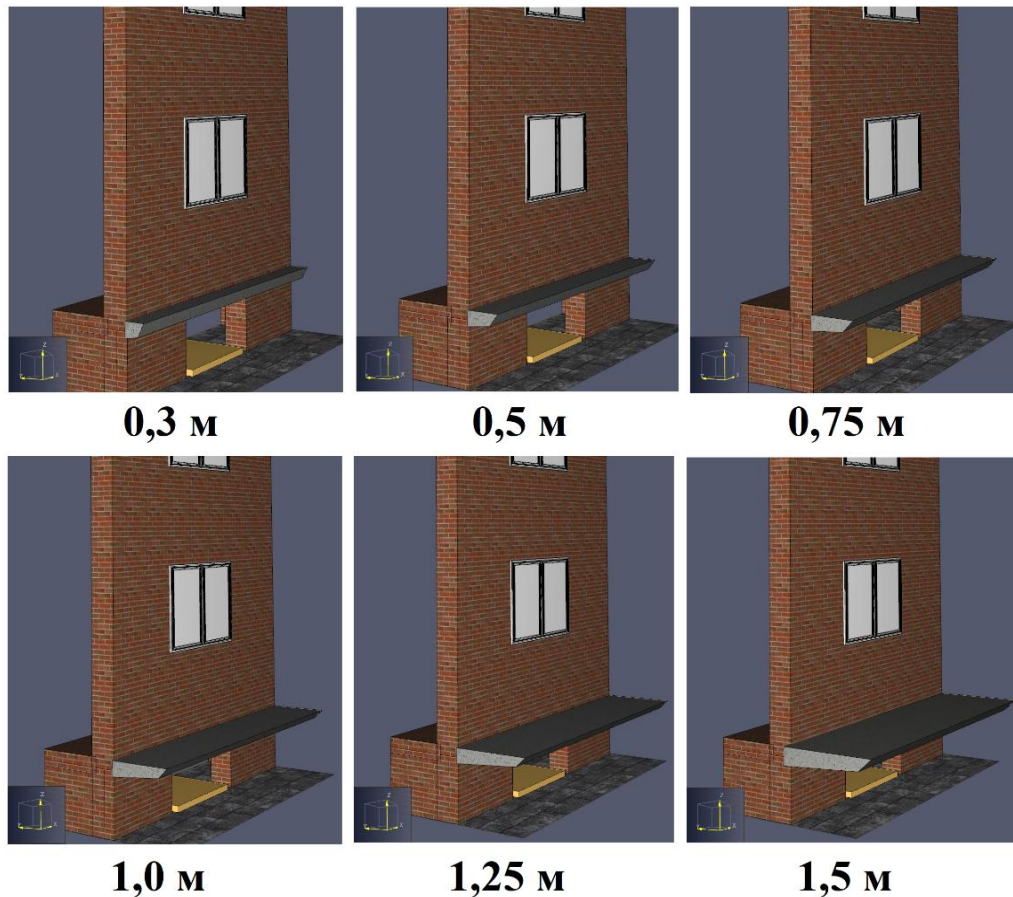
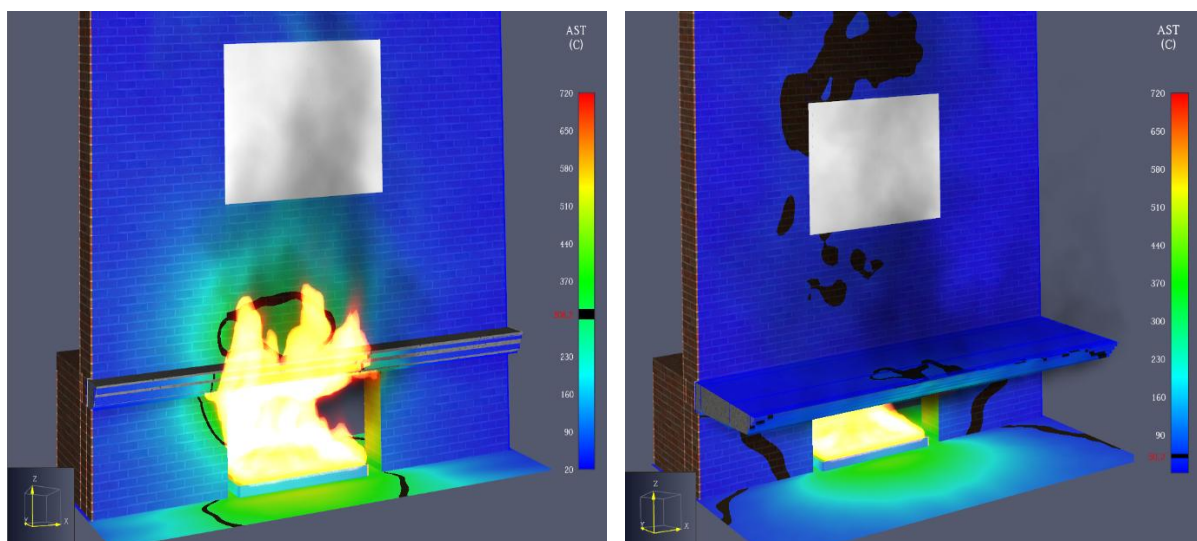


Рисунок 3.32 – Зовнішній вигляд створених комп'ютерних моделей протипожежних карнизів з формою «вінглету» шириною від 0,3 м до 1,5 м.

За результатом досліджень проведених методом комп'ютерного моделювання розрахункової пожежі, отримані експериментальні дані, щодо температурних розподілів на поверхні фасаду, який обладнано протипожежним карнизом з формою «вінглету» із шириною виступу від 0,3 м до 1,5 м при значенні пожежної навантаги 780 МДж/м^2 без впливу вітру, а також при наявності бокового вітру зі швидкістю 5 м/с. На рисунку 3.33 наведено приклад зміни характерів температурних розподілів на поверхні фасаду, а також граничні температурні значення (чорний контур) при застосуванні визначеного

типу протипожежного карнизу шириною 0,3 м та 1,5 м.



а)

б)

Рисунок 3.33 – Візуалізація температурних розподілів на фасаді, який захищений протипожежним карнизом з формою «вінглету» шириною 0,3 м (а) та 1,5 м (б) без впливу бокового вітру.

Граничне максимальне зафіксоване значення температури на поверхні фасаду при застосуванні протипожежного карнизу з формою «вінглету» та шириною виступу 0,3 м без вітрового впливу за даних умов моделювання склало до 308 °С, а при наявності вітрового впливу в 5 м/с склало 296 °С. Отримані дані для протипожежного карнизу шириною 1,5 м з формою «вінглету» та без вітрового впливу за даних умов моделювання, демонструють що максимальна температура не перевищила до 51 °С, а при наявності вітрового впливу в 5 м/с склало 45 °С. Ефект повторного приєднання полум'я до фасаду при ширині карнизу 0,3 м відбувається в діапазоні висоти 3,8-4,2 м, що не суттєво відрізняється від результатів моделювання для багатогранного протипожежного карнизу «вінглету», та протипожежного карнизу із формою із шириною 0,3 м. Разом із тим, визначено, що ефект повторного приєднання полум'я можливо уникнути при ширині протипожежного карнизу в 0,75 м. Також, для даного типу протипожежного карнизу структура висхідного потоку

мала більш виражений профіль, що приведено на рисунку 3.34.

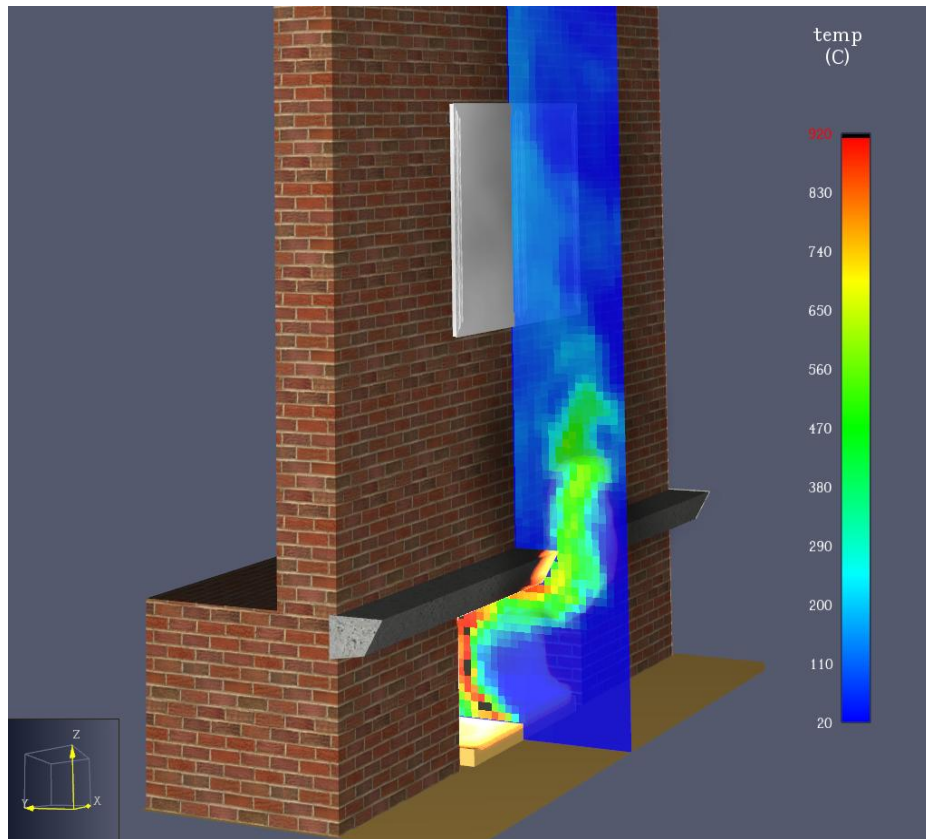


Рисунок 3.34 – Візуалізація динаміки поширення вихідного потоку при застосуванні протипожежного карнизу у формі «вінглету».

Максимальна площа критичного прогріву, який спостерігався при застосуванні даного типу протипожежного карнизу шириною 0,3 м не перевищила 12 % від загальної площі фрагменту досліджуваного фасаду, що для даного етапу моделювання є найкращим показником ефективності у порівнянні із іншими досліджуваними карнизами із аналогічною шириною виступу. На рисунку 3.35 наведено візуалізацію температурних розподілів на фасаді, який захищений протипожежним карнизом багатогранної форми при впливі бокового вітру зі швидкістю 5 м/с.

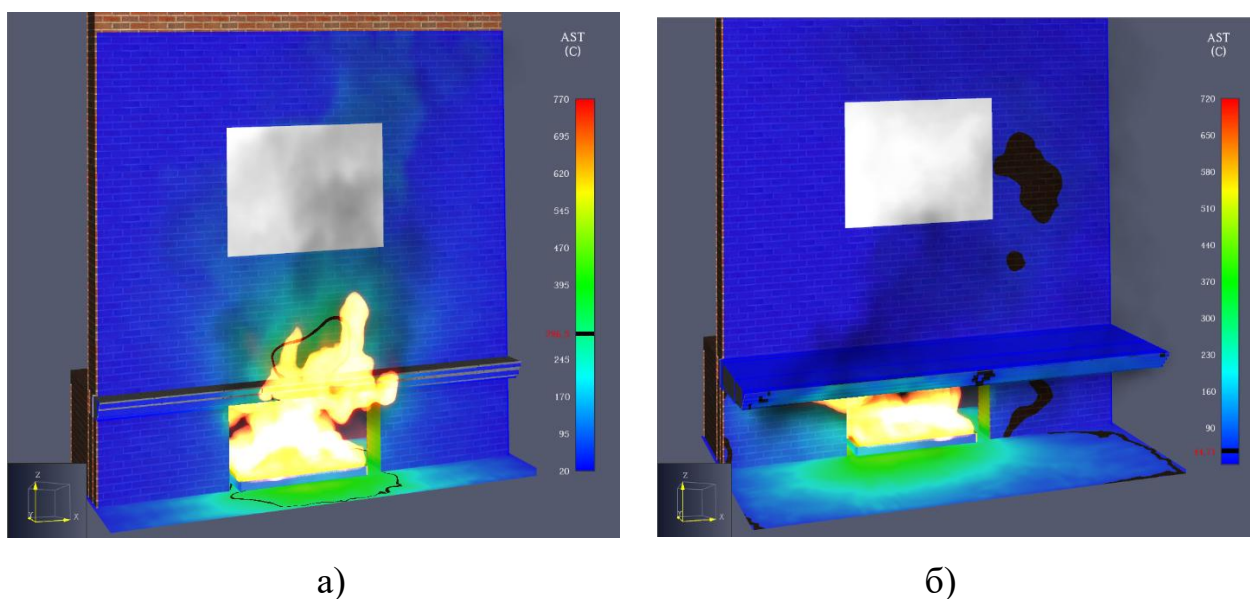


Рисунок 3.35 – Візуалізація температурних розподілів на фасаді, який захищений протипожежним карнизом у формі «вінглету» з шириною виступу 0,3 м (а) та 1,5 м (б) при впливі бокового вітру.

За результатом даного етапу експериментального моделювання встановлено, що протипожежний карниз у формі «вінглету» вплинув на висоту утворення зони повторного приєднання полум'я до фасаду у порівнянні із іншими типами протипожежних карнизів. Зокрема даний тип протипожежного карнизу недоцільно використовувати для захисту експлуатованих покрівель будівель, оскільки ефект повторного приєднання полум'я може спричинити займання горючих матеріалів, які можуть знаходитися покрівлі (в тому числі технологічні установки) або пошкодити її конструкцію.

Наступний етап експериментальних досліджень дозволив визначити значення середньої швидкості висхідного потоку та значення тиску в зоні фасаду від дії пожежі при наявності впливу бокового вітру та без нього. На рисунку 3.36 наведено візуалізацію швидкості висхідного потоку при застосуванні визначеного типу протипожежного карнизу шириною 0,3 м та 1,5 м при відсутності впливу вітру.

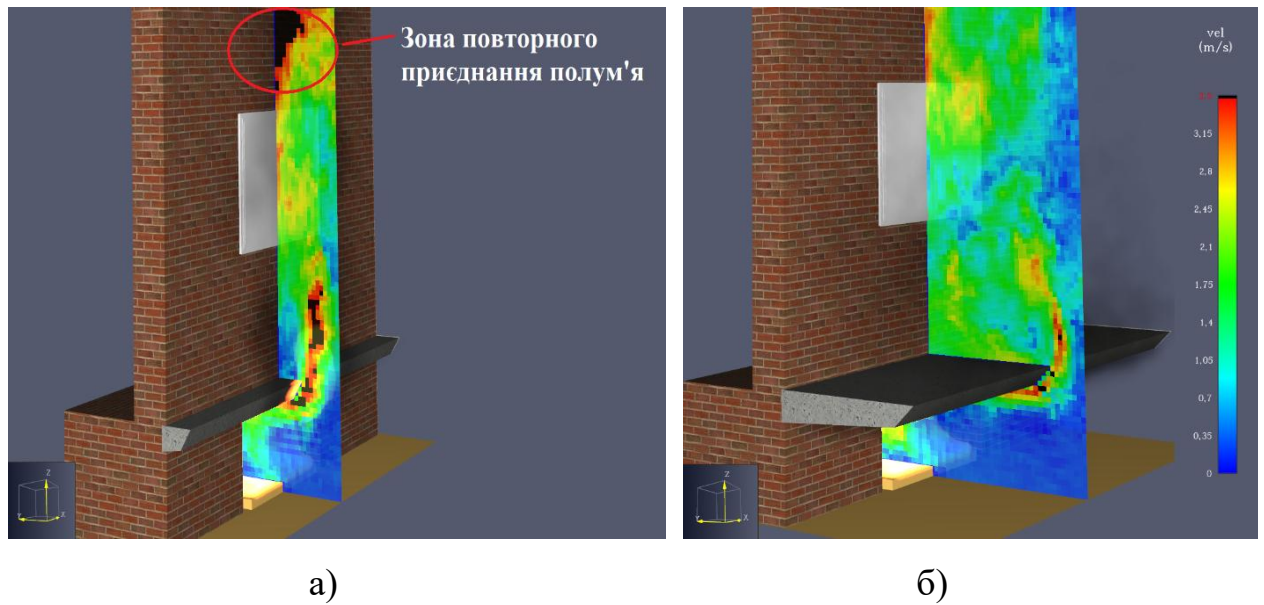


Рисунок 3.36 – Швидкість висхідного потоку при застосуванні протипожежного карнизу шириною 0,3 м (а) та 1,5 м (б) при відсутності впливу вітру.

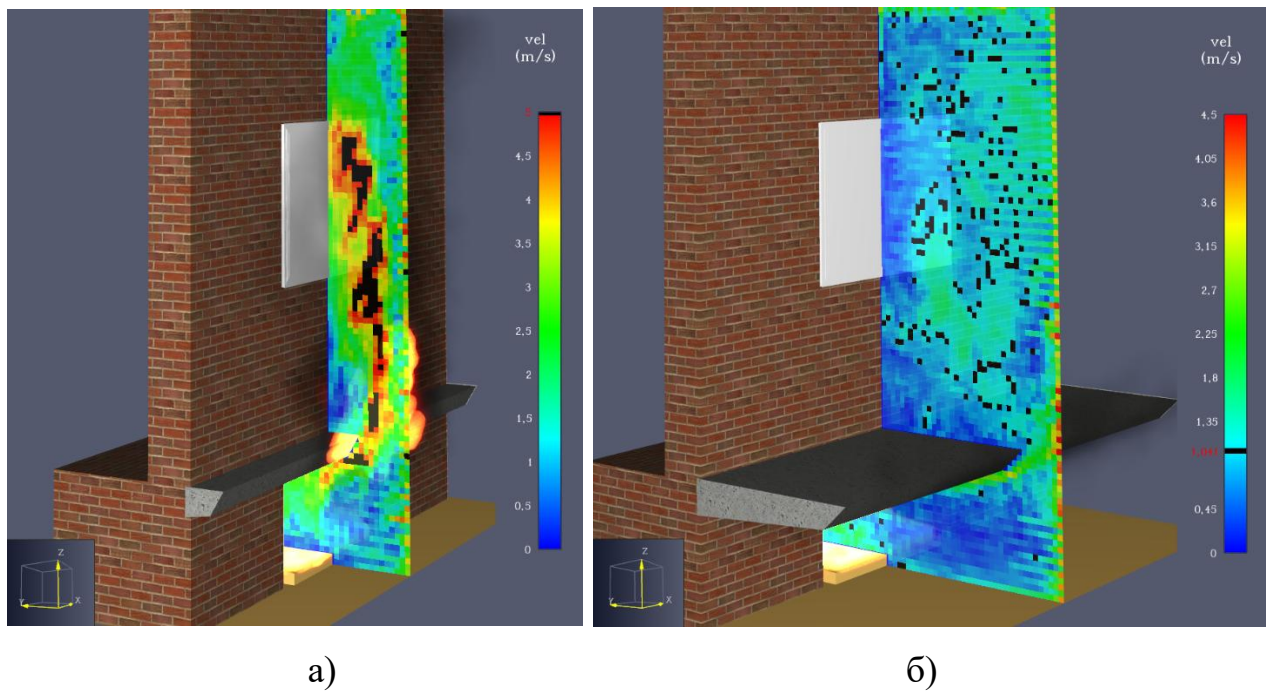
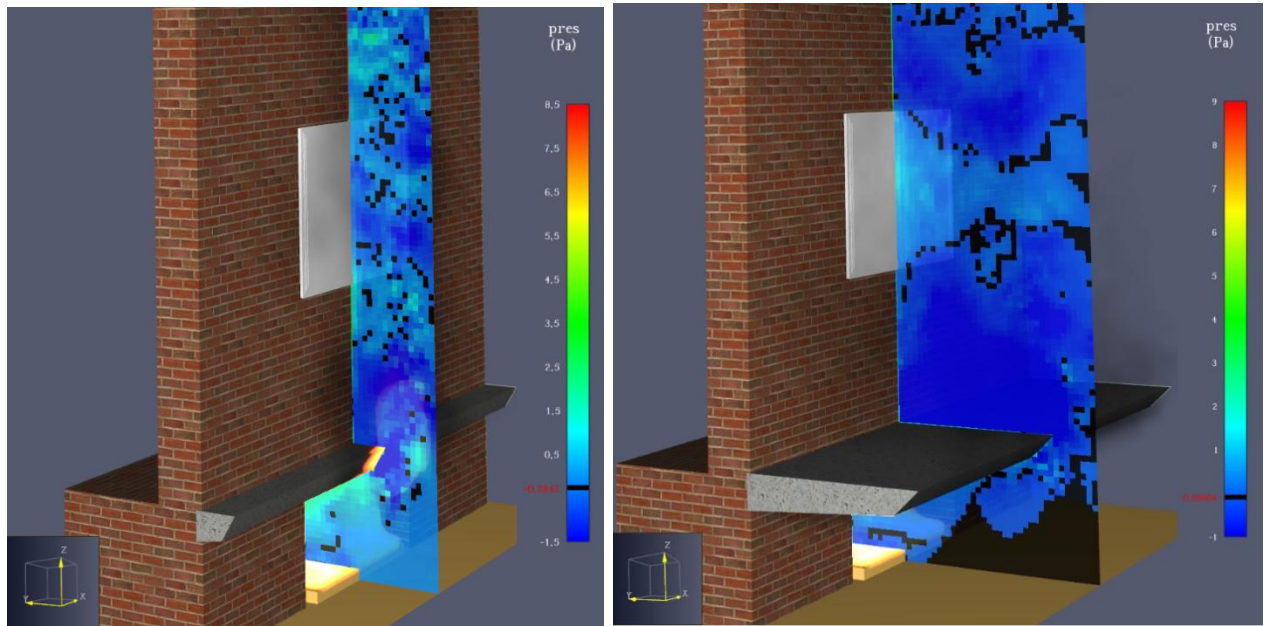


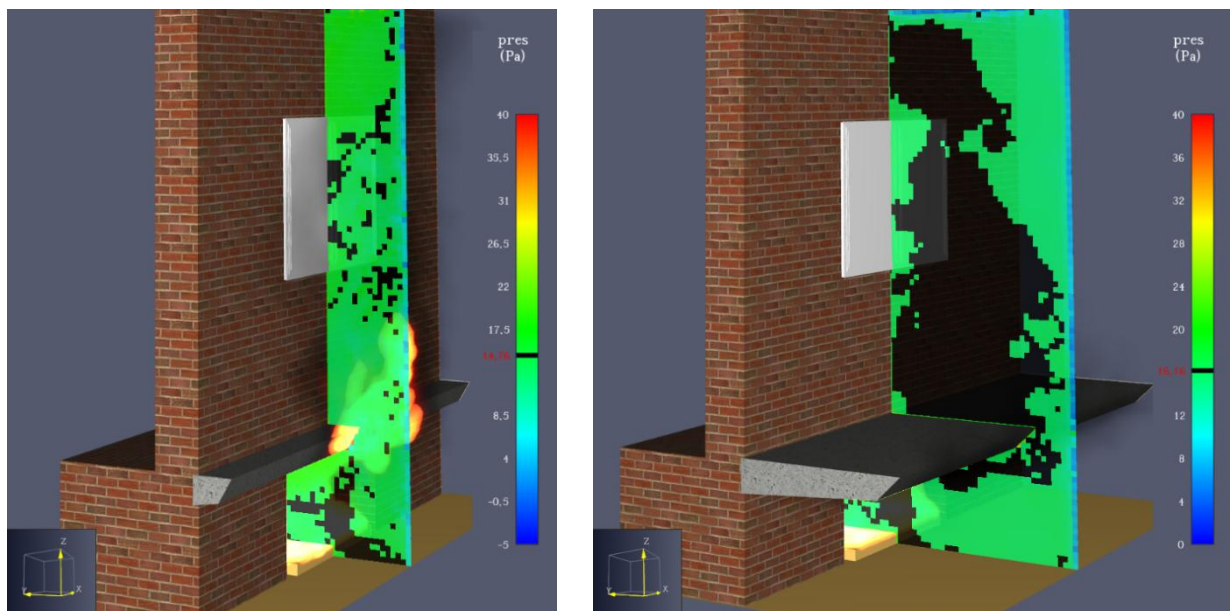
Рисунок 3.37 – Швидкість висхідного потоку при застосуванні протипожежного карнизу шириною 0,3 м (а) та 1,5 м (б) при впливі бокового вітру зі швидкістю 5 м/с.



а)

б)

Рисунок 3.38 – Значення тиску в зоні фасаду від дії пожежі при застосуванні протипожежного карнизу шириною 0,3 м (а) та 1,5 м (б) при відсутності впливу вітру.



а)

б)

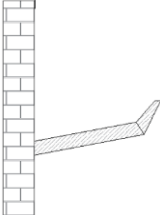
Рисунок 3.39 – Значення тиску в зоні фасаду від дії пожежі при застосуванні протипожежного карнизу шириною 0,3 м (а) та 1,5 м (б) при впливі бокового вітру зі швидкістю 5 м/с.

За результатом проведеного етапу досліджень, щодо дослідження впливу конструктивних параметрів протипожежного карнизу у формі «вінглету» на процеси обмеження поширення пожежі на вище розташовану зовнішню площину фасаду встановлено, що даний тип протипожежної перешкоди є відносно ефективним для запобігання поширення пожежі. Разом із цим, даний тип фасадної протипожежної перешкоди може бути більш ефективним для захисту обмеження поширення пожежі на покрівлю будівлі, оскільки дозволяє створити зону в межах до 1,4 м висоти, де значення температури від дії пожежі не перевищує 170 °С. Разом із цим, протипожежний карниз у формі «вінглету» має недолік, який значно може вплинути на можливість поширення пожежі між протипожежними відсіками, оскільки виявлено ефект повторного приєднання полум'я на висоті фасаду в межах 1,7 до 4,2 м при його ширини до 0,3 м, що супроводжується утворенням в даній зоні фасаду температурного режиму в межах 550-600 °С.

Таким чином, його застосування для забезпечення обмеження поширення пожежі між вертикальними протипожежними відсіками є недоцільним для даних умов конструкції фрагменту фасаду будівлі, оскільки його наявність може призвести до появи ефекту повторного приєднання полум'я в зоні розташування вікон або інших типів заповнення світлових прорізів. Це, у свою чергу, може спричинити руйнування світлопрозорих конструкцій і втрату їх вогнестійких властивостей, що підвищує ризик проникнення полум'я у внутрішні приміщення. Отже, при проектуванні фасадних протипожежних перешкод доцільно обмежувати застосування карнизів типу «вінглет» у зонах розташування прорізів або комбінувати їх з іншими інженерними рішеннями для мінімізації зазначеного ефекту.

За результатом проведених розрахункових дій та досліджень, систематизовані результати щодо поширення пожежі по фасаді обладнаного протипожежним карнизом з формою «вінглету» із шириною від 0,3 м до 1,5 м наведено в таблиці 3.6.

Таблиця 3.6 – Дані, що характеризують процеси поширення пожежі на вище розташовані поверхи для фасаду, який обладнано протипожежним карнизом з формою «вінглету»

Тип протипожежного карнизу	Ширина карнизу, м	Максимальне значення температури зафіксоване в зоні фасаду °С, (наявність ефекту повторного приєднання полум'я, «+»)	Площа критичного прогріву, % (±5 %)	Висота зони критичного значення температур и, м (±0,2 м)	Середня швидкість висхідного потоку, м/с (±0,3 м/с)	Значення тиску в зоні фасаду, Па (±10 %)
з формою «вінглету» 	0,3	296/308 (+)	11/12	1,8/1,7	5,0/5,0	14,7/0,1
	0,5	220/243	-	-	4,2/4,5	15,0/0,1
	0,75	210/225	-	-	3,7/4,2	15,3/0,1
	1,0	150/160	-	-	3,1/3,8	15,6/0,1
	1,25	90/95	-	-	2,4/3,6	15,9/0,1
	1,5	45/51	-	-	1,2/3,5	16,2/0,1

Заключним етапом експериментального моделювання є дослідження впливу протипожежного карнизу із заокругленою формою, на ефективність процесу обмеження поширення пожежі на вище розташовані поверхи. Для даного етапу експериментальних досліджень розроблено модель протипожежного карнизу з відповідною формою та параметрами, який виступає з межі фасаду на ширину 0,3 м, 0,5 м, 0,75 м, 1,0 м, 1,25 м та 1,5 м. Оцінювання ефективності обмеження поширення зовнішньої пожежі при значенні її пожежної навантаги в 780 МДж/м² в середині приміщення відбувалося за попередньо визначеною методикою. Геометричні параметри карнизу склали - товщина карнизу в основі його кріплення біля зони фасаду склала 0,5 м, кут виступаючої частини є змінним параметром який залежить від ширини виступу заокругленої частини протипожежного карнизу. На рисунку 3.40 наведено візуалізацію створеної моделі досліджуваного типу протипожежного карнизу.

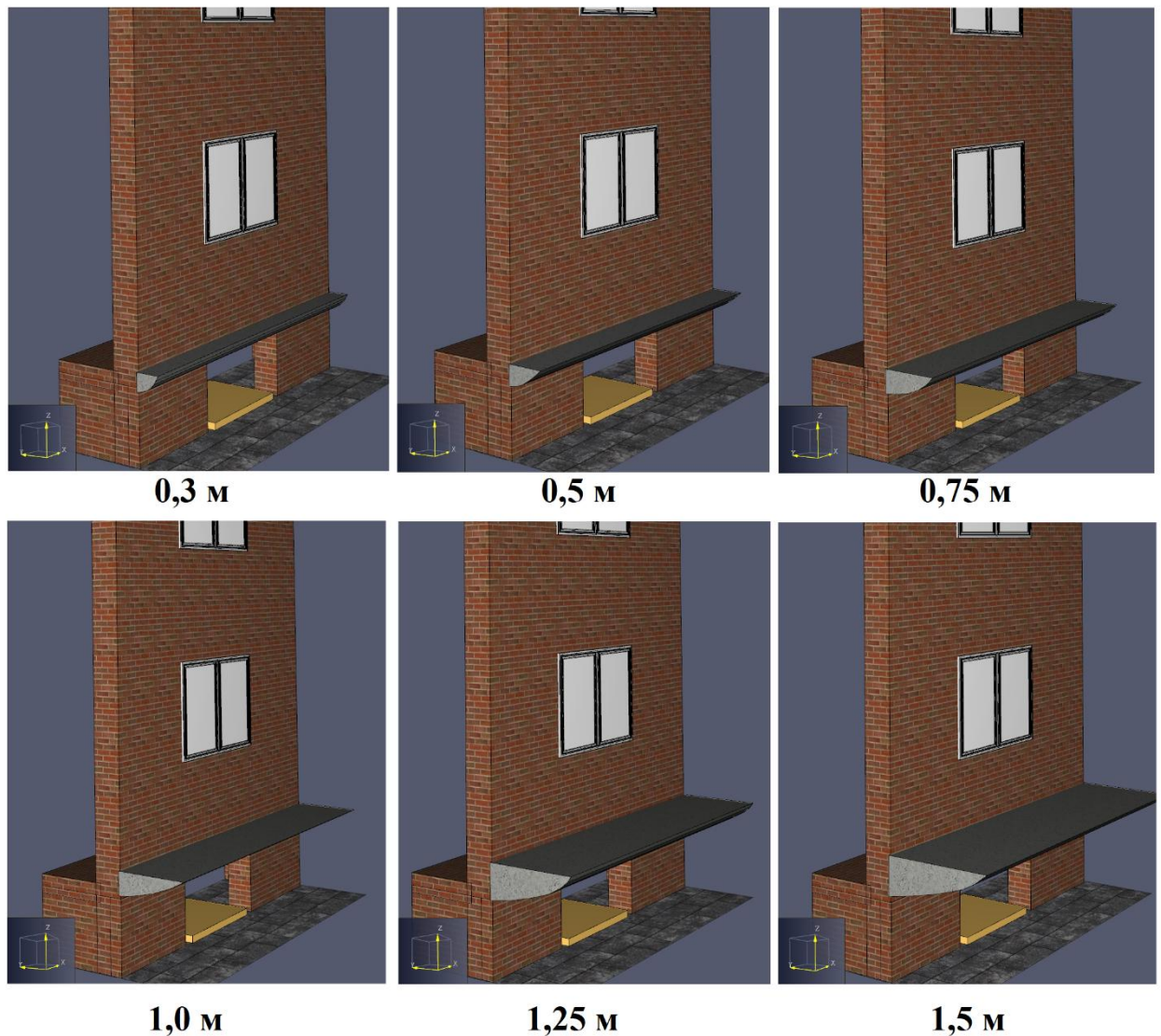


Рисунок 3.40 – Зовнішній вигляд створених комп'ютерних моделей протипожежних карнизів із заокругленою формою з шириною виступу від 0,3 м до 1,5 м.

За результатом проведених досліджень методом комп'ютерного моделювання розрахункової пожежі, отримано експериментальні дані, щодо температурних розподілів на поверхні фасаду, який обладнано протипожежним карнизом із заокругленою формою та із шириною виступу від 0,3 м до 1,5 м при значенні пожежної навантаги 780 МДж/м^2 без впливу вітру, а також при наявності бокового вітру зі швидкістю 5 м/с. На рисунку 3.41 наведено приклад зміни характерів температурних розподілів на поверхні фасаду, а також граничні температурні значення (чорний контур) при застосуванні визначеного

типу протипожежного карнизу шириною 0,3 м та 1,5 м.

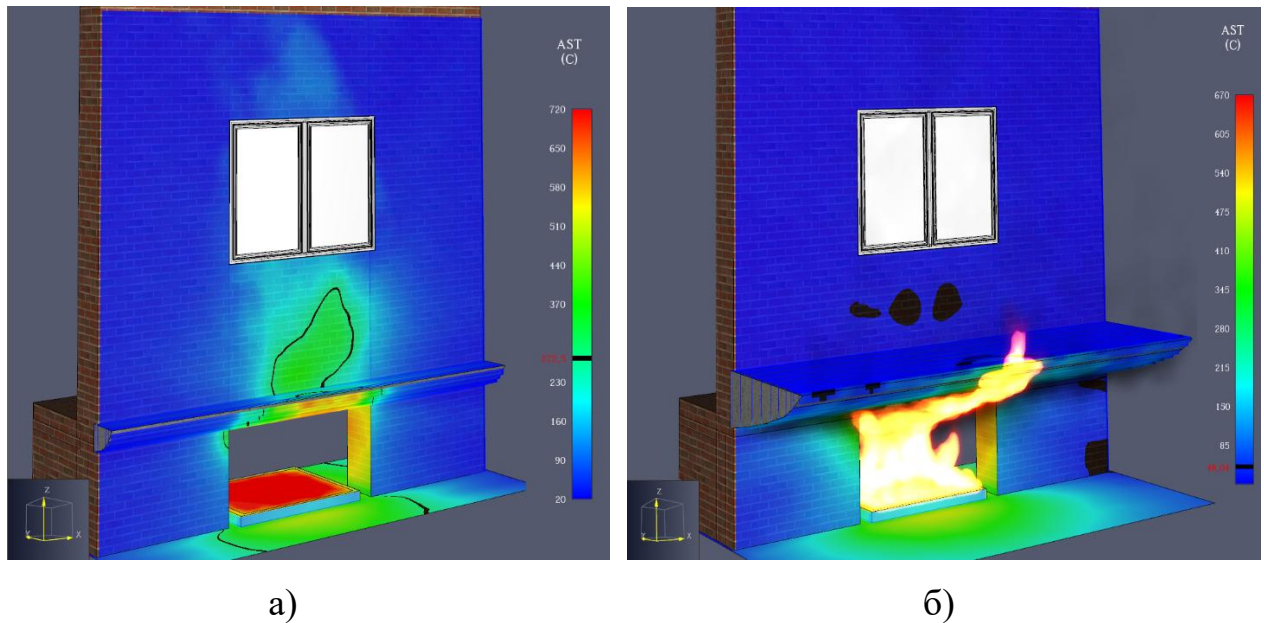


Рисунок 3.41 – Візуалізація температурних розподілів на фасаді, який захищений протипожежним карнизом із заокругленою формою шириною 0,3 м (а) та 1,5 м (б) без впливу бокового вітру.

Граничне максимальне зафіксоване значення температури на поверхні фасаду при застосуванні протипожежного карнизу із заокругленою формою та шириною виступу 0,3 м без вітрового впливу для даних умов моделювання склало до 272 °С, а при наявності вітрового впливу в 5 м/с склало 320 °С. Отримані дані свідчать, що наявність заокругленої гладкої форми протипожежного карнизу разом із наявністю вітру створює несприятливі умови для забезпечення процесу обмеження поширення пожежі для даної ширини протипожежного карнизу. Отримані дані для протипожежного карнизу шириною 1,5 м із заокругленою формою та без вітрового впливу за даних умов моделювання, демонструють що максимальна температура не перевищила до 48 °С, а при наявності вітрового впливу в 5 м/с склало 55 °С. Ефект повторного приєднання полум'я до фасаду при ширині карнизу 0,3 м та 0,5 м відбувається в діапазоні висоти 0,2-1,8 м, що підтверджує утворення негативного явища повторного приєднання полум'я до фасаду, при цьому структура висхідного

потоків мала більш виражений профіль, що приведено на рисунку 3.42.

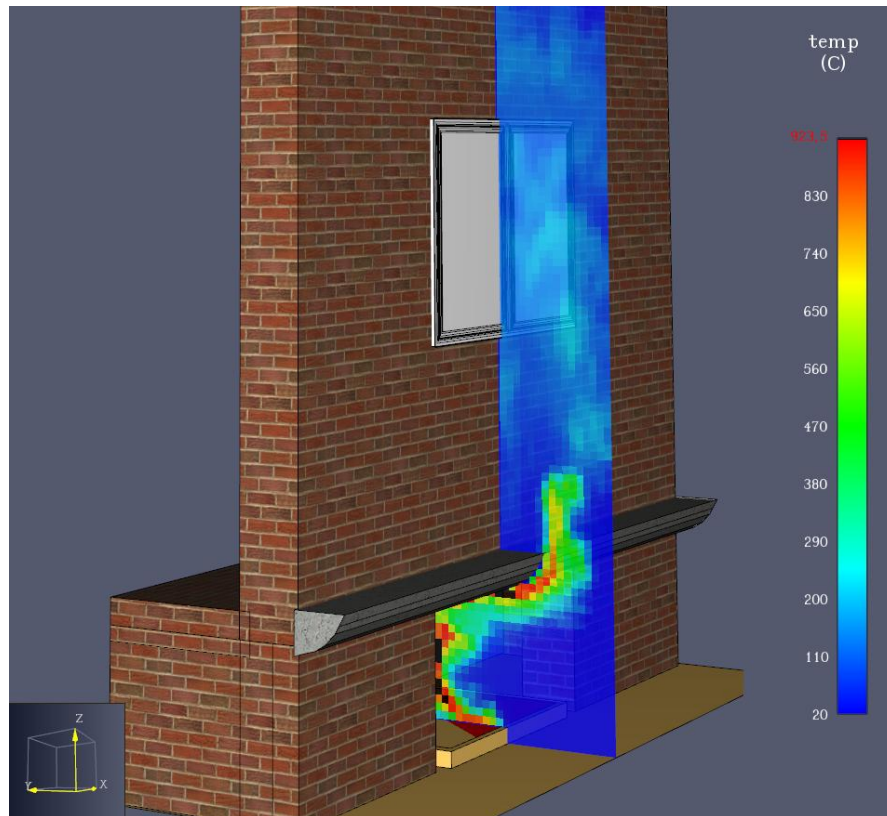


Рисунок 3.42 – Візуалізація динаміки поширення висхідного потоку при застосуванні протипожежного карнизу у формі «вінглету».

Максимальна площа критичного прогріву поверхні фасаду, що спостерігався при застосуванні даного типу протипожежного карнизу шириною 0,3 м не перевищила 28 % від загальної площі фрагменту досліджуваного фасаду, що для даного етапу моделювання є опосередкованим показником ефективності у порівнянні із іншими досліджуваними типами протипожежних карнизів із аналогічною шириною виступу. На рисунку 3.43 наведено візуалізацію температурних розподілів на фасаді, який захищений протипожежним карнизом багатогранної форми при впливі бокового вітру зі швидкістю 5 м/с.

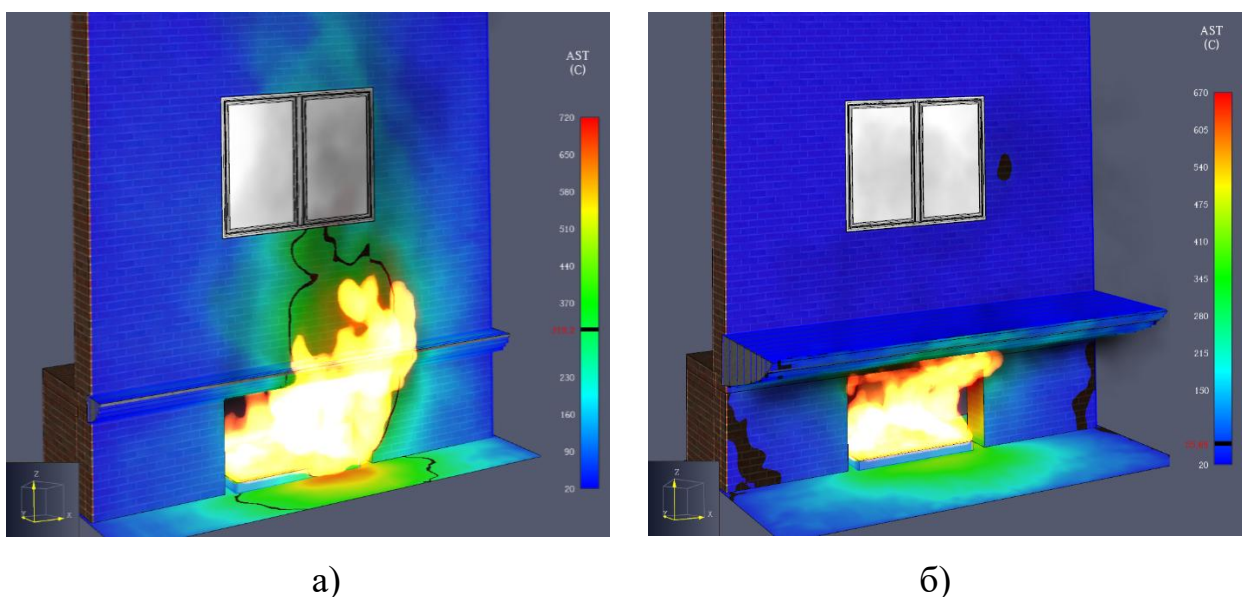


Рисунок 3.43 – Візуалізація температурних розподілів на фасаді, який захищений протипожежним карнизом у формі «вінглету» з шириною виступу 0,3 м (а) та 1,5 м (б) при впливі бокового вітру.

Аналіз отриманих даних свідчить, що протипожежні карнизи із пивною або заокругленою формою впливають на збільшення швидкості висхідного потоку від пожежі, і при ширині їх виступу більше 0,75 м вони досить ефективно відводять тепло та інші негативні чинники пожежі від площини фасаду. Разом із цим, утворення надмірної швидкості (більше 15 м/с) на ділянці фасаду у 0,5-2,0 м спричиняє утворення завихрення та зупинку теплового потоку, а також тиску в зоні вище 2 м, що в свою чергу призводить до ефекту повторного приєднання полум'я до фасаду. Таким чином, даний тип протипожежних карнизів найбільш ефективний для захисту експлуатованих покрівель та фасадів із позитивним кутом нахилу відносно горизонтальної поверхні. На рисунку 3.44 наведено дані щодо швидкості висхідного потоку в зоні фасаду при застосуванні протипожежного карнизу із заокругленою формою.

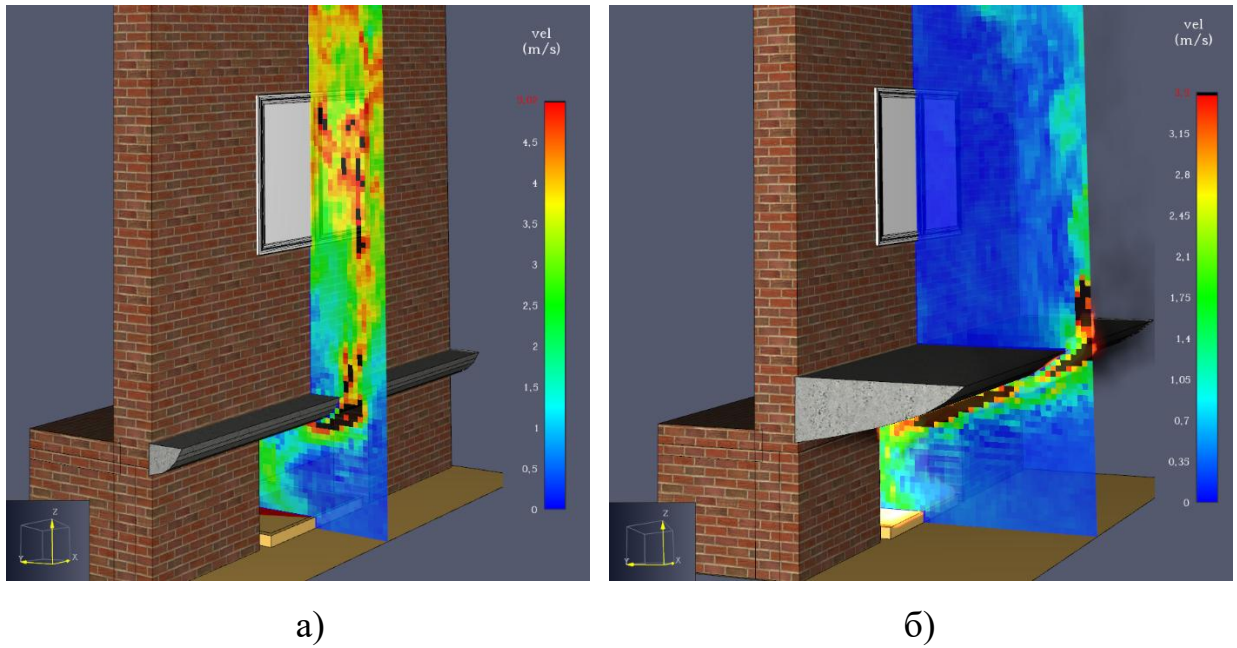


Рисунок 3.44 – Швидкість висхідного потоку при застосуванні протипожежного карнизу із заокругленою формою шириною 0,3 м (а) та 1,5 м (б) при відсутності впливу вітру.

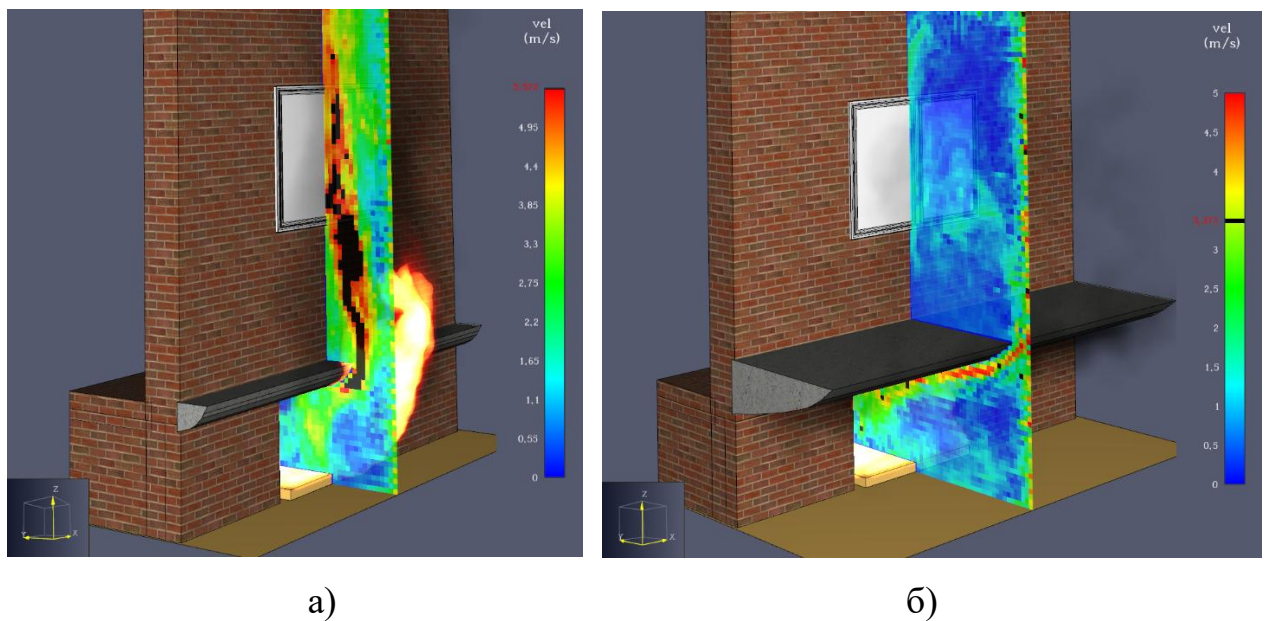
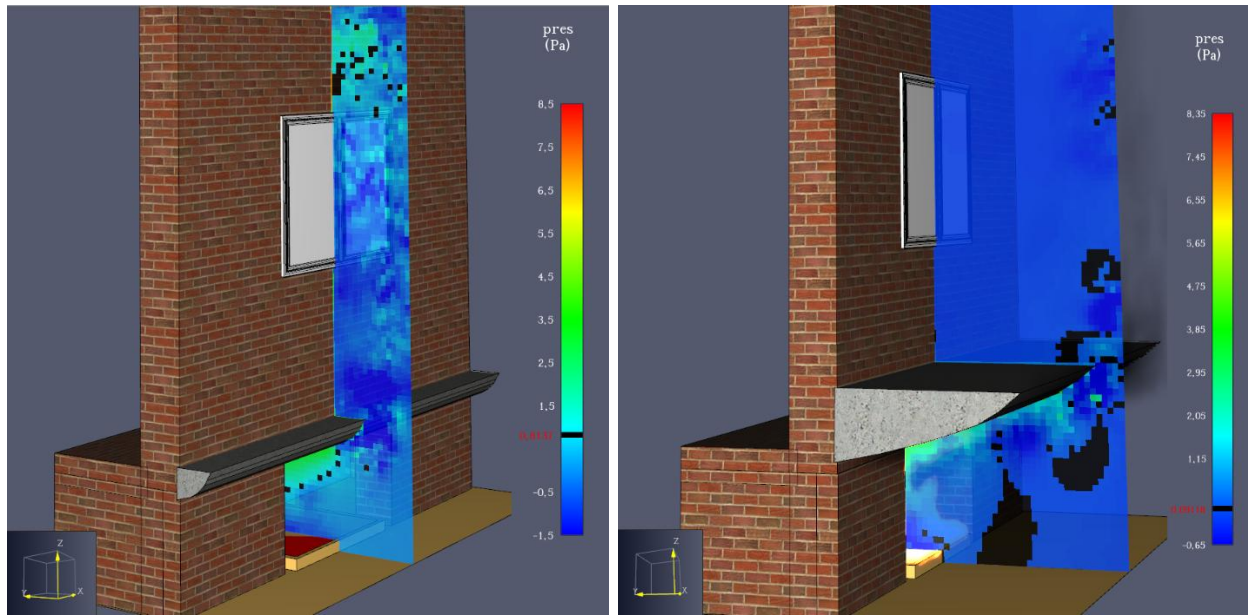


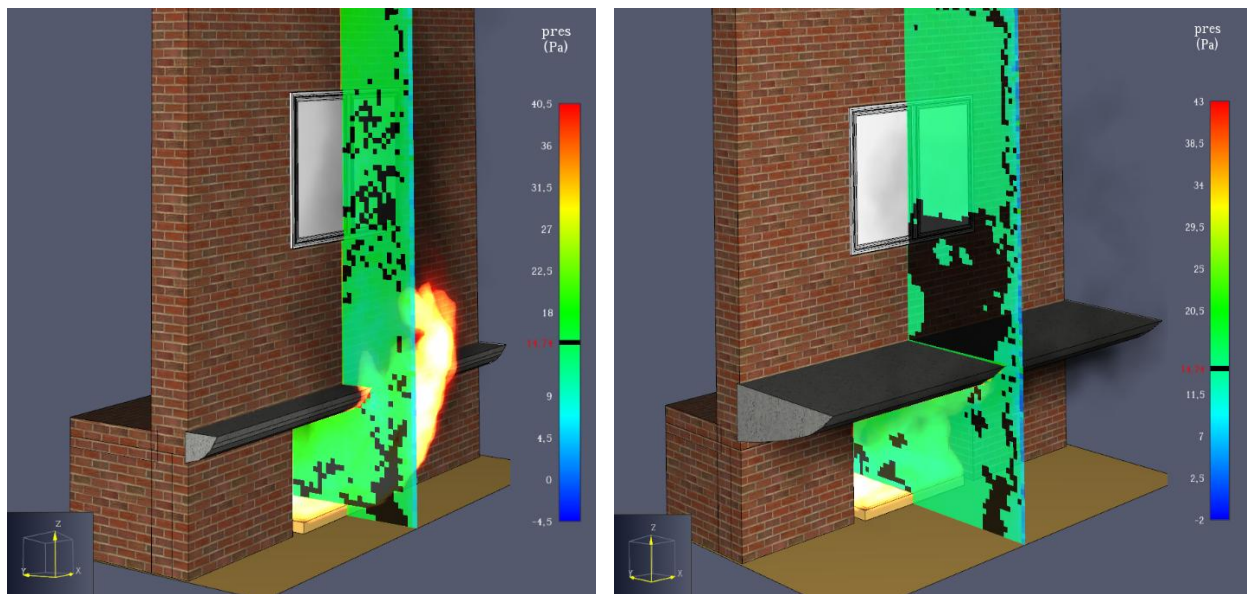
Рисунок 3.45 – Швидкість висхідного потоку при застосуванні протипожежного карнизу із заокругленою формою шириною 0,3 м (а) та 1,5 м (б) при впливі бокового вітру зі швидкістю 5 м/с.



а)

б)

Рисунок 3.46 – Значення тиску в зоні фасаду від дії пожежі при застосуванні протипожежного карнизу шириною 0,3 м (а) та 1,5 м (б) при відсутності впливу вітру.



а)

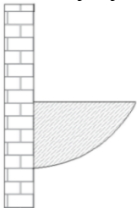
б)

Рисунок 3.47 – Значення тиску в зоні фасаду від дії пожежі при застосуванні протипожежного карнизу із заокругленою формою шириною 0,3 м (а) та 1,5 м (б) при впливі бокового вітру зі швидкістю 5 м/с.

За результатом проведених досліджень на базі розробленої газо-гідродинамічної моделі визначено, що протипожежний карниз із заокругленою формою, як і протипожежний карниз із формою «вінглету» значно впливає на підвищення тиску в зоні площини фасаду (збільшує значення тиску в 1,5-2,0 рази до 20-30 Па) і є достатньо ефективним заходом для відведення небезпечних чинників пожежі від його площини. Разом із тим, дані типи протипожежних карнизів при їх значенні ширини 0,3 м та 0,5 м, а також через форму їх виступу утворюють зону турбулентності та як наслідок можуть спричиняти виникнення точки повторного приєднання полум'я до площини фасаду.

В таблиці 3.7 систематизовано отримані дані згідно визначених критеріїв щодо поширення пожежі по фасаду обладнаного протипожежним карнизом із заокругленою формою при його ширині від 0,3 м до 1,5 м.

Таблиця 3.7 – Дані, що характеризують процеси поширення пожежі на вище розташовані поверхи для фасаду, який обладнано протипожежним карнизом із заокругленою формою

Тип протипожежного карнизу	Ширина карнизу, м	Максимальне значення температури зафіксоване в зоні фасаду °С, (наявність ефекту повторного приєднання полум'я, «+»)	Площа критичного прогріву, % (±5 %)	Висота зони критичного значення температур и, м (±0,2 м)	Середня швидкість висхідного потоку, м/с (±0,3 м/с)	Значення тиску в зоні фасаду, Па (±10 %)
заокругленою формою виступу 	0,3	320/272 (+)	28/12	1,3/1,5	5,5/5,1	14,7/0,81
	0,5	285/275 (+)	14/7	1,4/1,6	5,2/4,9	14,7/0,75
	0,75	225/210	-	-	5,0/4,5	14,6/0,5
	1,0	190/180	-	-	4,8/4,2	14,6/0,4
	1,25	135/130	-	-	3,4/4,0	14,3/0,35
	1,5	55/48	-	-	3,7/3,5	14,2/0,1


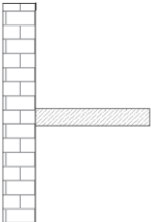
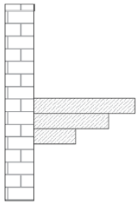
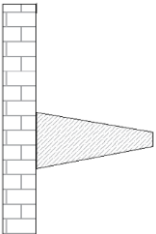
Таким чином, за результатом проведених досліджень обґрунтовано критерії оцінювання та розроблено програму експериментальних досліджень

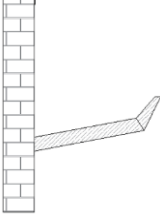
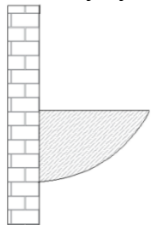
для обґрунтування гіпотези про те, що форма та конструктивні параметри протипожежних карнизів можуть значно впливати на ефективність обмеження поширення пожежі, а в окремих випадках їх форма може бути причиною більш стрімкого поширення вогню на вище розташовані поверхи будівлі. Отримані дані дозволяють узагальнити та систематизувати критерії, які характеризують ефективність обмеження поширення зовнішньої пожежі для різних функціональних частин будівель та споруд.

3.4. Узагальнення експериментальних даних та виявлених залежностей

Проведена серія експериментальних досліджень із застосуванням створеної газо-гідродинамічної моделі дозволила отримати дані, щодо фактичних значень максимальної площі критичного прогріву фасаду, висоти зони критичного прогріву фасаду, максимального зафіксованого значення температури на поверхні фасаду, а також середнє значення швидкості висхідного потоку та значення тиску в зоні фасаду при застосуванні визначених типів протипожежних карнизів. Окремим показником, що характеризує небезпеку можливого розвитку поширення пожежі є ефект повторного приєднання полум'я. Випадки. При яких спостерігався даний ефекти позначено в таблиці 3.8 червоним кольором штрихування. Систематизація отриманих даних дозволила оцінити вплив конструктивних параметрів протипожежних карнизів на динаміку процесів, щодо обмеження поширення небезпечних чинників пожежі на вище розташовані поверхи. Окрім цього, отримані дані дозволяють більш ефективно застосовувати протипожежні карнизи для захисту різних функціональних зон будівлі. Отримані експериментальні дані узагальнено та зведено до таблиці 3.8.

Таблиця 3.8 – Узагальнені дані експериментальних досліджень, що характеризують процеси поширення пожежі на вище розташовані поверхи для фасаду, який обладнано протипожежним карнизом із визначеними типами форм

Тип протипожежного карнизу	Ширина карнизу, м	Максимальне значення температури зафіксоване в зоні фасаду °С, (наявність ефекту повторного приєднання полум'я, «+»)	Площа критичного прогріву, % (±5 %)	Висота зони критичного значення температури, м (±0,2 м)	Середня швидкість висхідного потоку, м/с (±0,3 м/с)	Значення тиску в зоні фасаду, Па (±10 %)
Фасад без карнизу 	відсутній	323/473 (+)	78/73	6,5/5,7	2,1/2,4	1,2/20
Прямий 	0,3	360/ 387 (+)	69/72	6,0/5,8	3,4/4,7	4,7/0,4
	0,5	300/ 310 (+)	55/52	4,7/4,4	2,3/4,5	6,3/1,5
	0,75	260/ 270 (+)	17/15	4,2/4,0	2,1/4,2	8,1/2,2
	1,0	180/ 190 (+)	-	-	1,8/3,9	11,9/5,0
	1,25	120/ 125 (+)	-	-	1,4/3,7	14,5/8,5
	1,5	110/ 110	-	-	1,4/3,6	15,2/9,8
З формою багатогранника 	0,3	311/ 330 (+)	18/22	4,2/4,2	3,9/4,3	14,9/0,34
	0,5	200/220	-	-	2,1/2,2	8,2/0,2
	0,75	160/170	-	-	1,7/1,8	6,0/0,16
	1,0	140/150	-	-	1,7/1,8	5,0/0,12
	1,25	90/110	-	-	1,6/1,6	5,0/0,12
	1,5	75/80	-	-	1,5/1,5	4,0/0,06
З формою трапеції 	0,3	316/ 325 (+)	16/17	1,8/1,7	5,1/5,1	15,6/0,74
	0,5	220/230	-	-	3,5/4,5	15,2/0,69
	0,75	205/210	-	-	2,9/4,2	14,9/0,53
	1,0	160/170	-	-	2,2/3,9	14,7/0,38
	1,25	115/110	-	-	1,9/3,5	14,5/0,32
	1,5	54/72	-	-	1,3/3,4	14,1/0,25

з формою «вінглету» 	0,3	296/308 (+)	11/12	1,8/1,7	5,0/5,0	14,7/0,1
	0,5	220/243	-	-	4,2/4,5	15,0/0,1
	0,75	210/225	-	-	3,7/4,2	15,3/0,1
	1,0	150/160	-	-	3,1/3,8	15,6/0,1
	1,25	90/95	-	-	2,4/3,6	15,9/0,1
	1,5	45/51	-	-	1,2/3,5	16,2/0,1
заокругленою формою виступу 	0,3	320/272 (+)	28/12	1,3/1,5	5,5/5,1	14,7/0,81
	0,5	285/275 (+)	14/7	1,4/1,6	5,2/4,9	14,7/0,75
	0,75	225/210	-	-	5,0/4,5	14,6/0,5
	1,0	190/180	-	-	4,8/4,2	14,6/0,4
	1,25	135/130	-	-	3,4/4,0	14,3/0,35
	1,5	55/48	-	-	3,7/3,5	14,2/0,1

Аналіз отриманих даних демонструє, що форма протипожежного карнизу при його ширині в межах до 0,3 м суттєво не впливає на ефективність обмеження поширення пожежі за критерієм максимального значення температури, що фіксувалося на поверхні фасаду. Як виключення, найкращі показники за критерієм максимального значення температури був протипожежний карниз у формі «вінглету», який дозволив знизити її значення в межах 5-7%. Разом із цим, на висоті фрагменту фасаду в межах 1,4-1,7 м температура становила в межах 550-600 °С, зокрема в зоні де полум'я мало безпосередній постійний контакт з поверхнею фасаду. Площа критичного прогріву фасаду склала лише в межах 10-12% від всієї площі досліджуваного фрагменту фасаду, що свідчить про досить ефективне відведення полум'я від площини фасаду. Разом із тим, постійний контакт полум'я з поверхнею фасаду на рівні 1,4-1,7 м свідчить про явище повторного приєднання полум'я до фасаду фактично в зоні розташування вікна вищого поверху, що створює умови для швидкого руйнування світлопрозорої конструкції та поширення пожежі в середину приміщення даного поверху.

Найгіршу ефективність в частині критерію максимального значення

температури, що фіксувалося на поверхні фасаду отримав карниз із прямою формою виступу. При цьому, для даного типу карнизу спостерігалось найбільша площа критичного прогріву, а саме значення площі сягало до 70% від загальної площі досліджуваного фрагменту фасаду.

Окремо слід відзначити, що для протипожежного карнизу з прямою формою спостерігався ефект повторного приєднання полум'я фактично для будь якої ширини його виступу, а саме від 0,3 м і до 1,25 м, що є найгіршим показником серед всіх типів карнизів.

Найкращі показники динамічного зменшення значення температурного режиму в зоні фасаду при збільшенні ширини виступу протипожежного карнизу зафіксовано для протипожежного карнизу із багатогранною формою. За результатом моделювання було доведено, що наявність багатогранних виступів із прямокутним профілем кожного, створює зону найменшої швидкості висхідного потоку від початкового імпульсу (1,5-1,7 м/с) та найменшого значення тиску поза зоною фасадної площини (4-6 Па). Це дозволяє створити траєкторію полум'я, при якій утворення точки повторного приєднання полум'я в зоні самого фасаду є малоімовірним.

Аналіз отриманих показників критеріїв, що характеризують небезпеку поширення пожежі ззовні фасаду будівлі показав, що протипожежний карниз з у формі «вінглету» дозволяє забезпечити максимальне значення тиску в зоні фасаду (в межах 14,5-15,5 Па) при достатньому значенні швидкості (3-5 м/с). Дані характеристики забезпечують найбільшу відносну ефективність за критерієм максимальної площі критичного прогріву (не більше 12% від всієї захищеної площі фасаду) та найменший діапазон температур на його поверхні. Разом із цим, протипожежний карниз у формі «вінглету» та протипожежний карниз із заокругленою формою виступу при їх ширині до 0,5 м недоцільно використовувати для захисту фасаду на межі протипожежних відсіків між стилобатом та висотною частиною, а також на межі протипожежних відсіків, які розділяють висотну вертикальну частину будівлі.

Протипожежний карниз із формою трапеції в частині критеріїв максимального значення температури на поверхні фасаду, а також показника максимальної площі критичного прогріву показав фактично подібні показники ефективності, як і протипожежний карниз у формі «вінглету». Разом із тим, у порівнянні із протипожежним карнизом у формі «вінглету» протипожежний карниз з формою трапеції має дещо гіршу динаміку зменшення значення температурного режиму в зоні фасаду при збільшенні ширини виступу протипожежного карнизу.

Загалом, розроблена програма експериментальних досліджень поширення пожежі ззовні будівлі та дослідження умов запобігання її поширення при використанні різних типів протипожежних карнизів дозволила отримати дані, щодо критеріїв, які впливають на процеси обмеження поширення пожежі ззовні фасаду на вище розташовані поверхи, а також оцінити їх відносну ефективність для забезпечення пасивного захисту фасадів будівель. За результатами даного етапу досліджень визначено, що протипожежний карниз у формі «вінглету» має найкращі показники ефективності за визначеними критеріями безпеки. Разом із цим, постає завдання експериментально підтвердити отримані дані, використовуючи верифіковану та апробовану програму натурних вогневих досліджень процесів обмеження поширення пожежі ззовні фасадів, яка дозволяє застосовувати пасивні системи перешкоджання поширення пожежі (протипожежні карнизи) різних типів, а також дозволяє відтворити найбільш несприятливі умови при яких може відбуватися поширення пожежі на вище розташований поверх.

3.5. Висновки до розділу

1. За результатом досліджень процесів взаємодії полум'я пожежі з протипожежними перешкодами з використанням засобів комп'ютерного моделювання встановлено, що форма протипожежного карнизу при його ширині виступу в межах до 0,3 м не впливає на ефективність обмеження

поширення пожежі за критерієм температури на поверхні фасаду, при цьому найменшу ефективність мав карниз з прямою формою виступу, що обумовлюється явищем повторного приєднання полум'я до фасаду.

2. З метою забезпечення комплексних підходів щодо можливості прогнозованого обмеження поширення пожежі систематизовано та узагальнено дані експериментальних досліджень, які характеризують небезпеку, що безпосередньо впливає на поширення зовнішньої пожежі на вище розташовані поверхи для фасадів, які обладнано протипожежними карнизами найбільш поширених типів. Проведено дослідження закономірностей впливу конструктивних параметрів протипожежних карнизів на ефективність запобігання вертикального поширення пожежі за визначеними критеріями оцінювання.

3. Виявлено, що найбільш ефективною фасадною протипожежною перешкодою за критерієм максимального значення температури на поверхні захищеного фасаду є протипожежний карниз у формі «вінглету», який дозволив знизити її значення в межах 5-7%. Разом із цим, на висоті фрагменту фасаду в межах 1,4-1,7 м спостерігався безпосередній контакт полум'я з поверхнею фасаду, що свідчить про явище повторного приєднання полум'я до фасаду фактично в зоні можливого розташування вікна вищого поверху.

4. На підставі отриманих експериментальних даних встановлено, що, протипожежний карниз у формі «вінглету» та протипожежний карниз із заокругленою формою виступу при їх ширині до 0,5 м недоцільно використовувати для захисту фасаду на межі протипожежних відсіків між стилобатом та висотною частиною, а також на межі протипожежних відсіків, які розділяють висотну вертикальну частину будівлі.

5. За показником динаміки зменшення значення температури в зоні фасаду при збільшенні ширини виступу протипожежного карнизу найкращі показники ефективності зафіксовано для протипожежного карнизу із багатогранною формою. За результатом моделювання було доведено, що

наявність багатогранних виступів із прямокутним профілем кожного, створює зону найменшої швидкості висхідного потоку від початкового імпульсу в межах 1,5-1,7 м/с та найменшого значення тиску поза зоною фасадної площини в межах 4-6 Па. Дані свідчать про можливість досягти траєкторії полум'я, при якій утворення точки повторного приєднання полум'я в зоні самого фасаду є малоймовірною.

6. Для підтвердження проведених розрахунків проведених методом використання газо-гідродинамічної моделі необхідно провести натурні експериментальні вогневі дослідження для підтвердження виявлених закономірностей впливу конструктивних параметрів протипожежних карнизів на процеси обмеження поширення пожежі ззовні фасаду будівлі.

РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ З ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОТИПОЖЕЖНИХ КАРНИЗІВ

Розділ присвячено експериментальним дослідженням та визначинню відносної обмежувальної ефективності протипожежних карнизів в залежності від їх типу та конструктивного виконання. На основі програми-методики проведено вогневі дослідження з визначення відносної ефективності протипожежних карнизів. Підтвердження результатів здійснено через параметричне оцінювання на прикладі реального об'єкта будівництва, що включало деталізацію його характеристик та моделювання конкретного розрахункового сценарію пожежі.

4.1. Програма-методика експериментальних вогневих досліджень з оцінювання обмеження поширення пожежі протипожежними карнизом

Попередні дослідження застосування протипожежних карнизів із застосуванням комп'ютерних моделей на основі газо-гідродинаміки дозволили визначити їх відносну ефективність у порівнянні із фасадом без захисту. Отримані дані продемонстрували, що зміна середнього значення швидкості висхідного потоку та значення тиску в зоні фасаду при застосуванні визначених типів протипожежних карнизів безпосередньо впливає на фактичне значення максимальної площі критичного прогріву фасаду, висоти зони критичного прогріву фасаду, максимального зафіксованого значення температури на поверхні фасаду, а також на створення ефекту повторного приєднання полум'я до площини фасаду будівлі.

За результатом проведених розрахункових дій попередньо було визначено, що протипожежний карниз з у формі «вінглету» дозволяє забезпечити максимальне значення тиску в зоні фасаду (в межах 14,5-15,5 Па) при достатньому значенні швидкості висхідного потоку (в межах 3-5 м/с). Дані характеристики забезпечують найбільшу відносну ефективність за критерієм

максимальної площі критичного прогріву (не більше 12% від всієї захищеної площі фасаду) та найменший діапазон температур на його поверхні. Тобто, порівняння отриманих даних з даними отриманими для базової моделі (фасад без карнизу) свідчить, що застосування протипожежного карнизу у формі «вінглету» навіть при його ширині виступу до 0,3 м дозволяє знизити максимальне значення температури біля поверхні фасаду до 35%, а площу критичного прогріву досліджуваного фрагменту фасаду фактично в рази.

Таким чином постало завдання, використовуючи обладнання та методологію для проведення натурних вогневих досліджень з прогнозування поширення пожежі по зовнішній поверхні фасаду будівлі, здійснити апробацію виявлених залежностей та закономірностей щодо ефективності даного типу карнизу. Для досягнення поставленої мети слід:

- на основі попереднього проведеного аналізу існуючих методик з оцінки заходів щодо запобігання поширення зовнішньої пожежі або прогнозування її можливого поширення по фасадам будівель, відтворити конструктивні параметри протипожежного карнизу у формі «вінглету» та протипожежний карниз прямої форми;

- визначити умови та критерії визначення відносної ефективності досліджуваних протипожежних карнизів в частині їх ефективності обмеження поширення пожежі по негорючим фасадам будівель, а також відповідні засоби вимірювальної техніки;

- провести натурні експериментальні дослідження з визначення ефективності обмеження поширення пожежі протипожежними карнизами визначених конструктивних типів;

- провести аналіз отриманих результатів та зробити висновок щодо відносної ефективності досліджуваних протипожежних карнизів за визначеними критеріями безпеки.

Установка для проведення досліджень та серії натурних вогневих випробувань (далі - Установка) є збірною металевою конструкцією для

влаштування досліджуваного фрагменту фасаду будівлі з врахуванням його технології конструктивного виконання та матеріалів виготовлення (оздоблення зовнішньої поверхні). Висота установки становить 2,0 м, а ширина 2,3 м. Вогнева камера знаходиться в нижній частині Установки з габаритами 1,8 м по ширині, 1,35 м глибини та 0,8 м по висоті виконана із вогнетривкої цегли. Вогнева камера виконана таким чином, щоб імітувати частину нижче розташованого поверху, де відбувається пожежа. Фактична відстань від верхнього краю вогневої камери до нижнього краю вікна складає 1,4 м, що відтворює параметри класичного житлового будинку згідно з вимогами [ДБН Житло]. У вогневій камері Установки влаштовується модельне вогнище пожежі класу В, з деком класу 34В, в яке заливають 50 л рідкого горючого палива (дизельне паливо). Даний тип горючої речовини та розмір модельного вогнища дозволяє створити модель пожежі, яка за своїми температурними параметрами є не нижчою за стандартний температурний режим, із загальною тривалістю горіння не менше 30 хв. При цьому значення пожежної навантаги для даного типу вогнища склало до 2300 МДж/м^2 [107]. На рис. 4.1 наведено креслення установки для відтворення фрагменту фасадної системи, що захищається протипожежним карнизом, а також фото її зовнішнього вигляду.

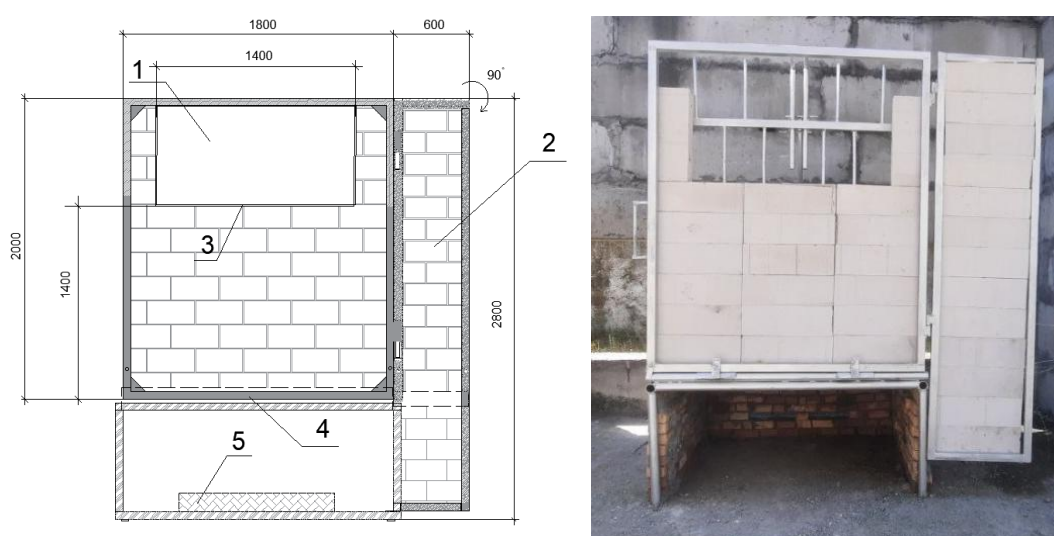


Рисунок 4.1 – Установка для прогнозування поширення пожежі по фасаді, де: 1 – віконний світловий проріз; 2 – бокова частина фасаду; 3 – верхній край вікна

вище розташованого поверху; 4 – зона влаштування досліджуваного типу протипожежного карнизу; 5 – металеве деко модельного вогнища пожежі класу 34В.

Наступним етапом підготовки експериментальних вогневих досліджень з оцінювання обмеження поширення пожежі фасадними протипожежними перешкодами є виготовлення моделей досліджуваних типів протипожежних карнизів. На фасадній стороні Установки на відстані 10 см від верхнього краю вогневої камери передбачається кріплення протипожежних карнизів досліджуваних типів, для визначення їх відносної ефективності. Також, для можливості порівняння впливу протипожежних карнизів на процеси поширення пожежі, перший етап вогневих досліджень проводиться для фасаду, на якому кріплення карнизів не передбачається. Конструкція протипожежних карнизів передбачає виготовлення їх з негорючих матеріалів, які не поширюють пожежу по своїй поверхні та не руйнуються (деформуються) при температурах в діапазоні 800-900 °С у продовж не менше ніж 30 хв. Під час проведення експериментальних досліджень, розглядалися наступні типи протипожежних карнизів:

- фрагмент фасаду, який не обладнано протипожежним карнизом;
- фрагмент фасаду з прямим протипожежним карнизом шириною 0,3 м;
- фрагмент фасаду з протипожежним карнизом загальною шириною виступу 0,3 м формою «вінглету».

В основі конструктивної моделі протипожежного карнизу використовується сталевий каркас, що повторює форму протипожежної перешкоди та є основою для матеріалів заповнення його конструкції. Сталеві елементи з'єднуються між собою методом зварювання, оскільки використання болтових з'єднань не розраховане на стандартний температурний режим пожежі. На рисунку 4.2 наведено фото виготовлення каркасу для одного із досліджуваних зразків протипожежних карнизів.



Рисунок 4.2 – Сталевий каркас протипожежного карнизу у формі «вінглету».

Конструкція протипожежного карнизу, а саме матеріали заповнення об'єму, що захищає від вертикального поширення пожежі, мають бути негорючими, стійкими до дії високих температур, і як правило мають клінкерну або цементну основу. Для даного етапу досліджень використовується фіброцементна панель, яка має в своєму складі цемент, армуючі волокна целюлози і мінеральні наповнювачі для покращення міцнісних властивостей. Заповнення об'єму протипожежного карнизу виключає утворення щілин, через які може поширюватись вогонь. Для конструкції протипожежного карнизу прямої форми використовувався газобетон, що класифікується як легкий бетон із вмістом понад 20 % бульбашок у цементному замісі. Застосування газобетону дозволяє зменшити вагу конструкції протипожежного карнизу без втрати його теплоізоляційних і вогнестійких характеристик. Завдяки пористій структурі цей матеріал ефективно уповільнює передачу тепла та сприяє зниженню температурного впливу на суміжні ділянки фасаду. У комплексі з фіброцементними панелями це забезпечує цілісність конструкції карнизу та підвищує його здатність перешкоджати вертикальному поширенню пожежі.

На рисунку 4.3 наведено фото виготовлених дослідних зразків протипожежних карнизів.



Рисунок 4.3 – Фото виготовлених зразків протипожежних карнизів шириною 0,3 м, де: а – протипожежний карниз у формі «вінглету»; б – протипожежний карниз прямої форми.

Для фіксації значення температури на поверхні фасаду використовують термопари, які рівномірно розміщені на поверхні фасаду та підключаються до вимірювально-обчислювальної системи «Термоконт» із розрахунку 1 термопара на $0,5 \text{ м}^2$ площі конструкції фасаду. Інтервал фіксації температури становить не менше 1 секунди у продовж всієї тривалості досліджень. Також для фіксації температурного режиму біля поверхні фасаду використовують тепловізор з діапазоном вимірювання температури не менше ніж від -10°C до 650°C . Також, під час натурних вогневих експериментальних випробуваннях здійснювалася фото-фіксація характеру поширення вогню на вище розташований поверх, на висоту до 2 м від верхнього краю вогневої камери. За результатами проведених натурних вогневих досліджень, отримані дані за визначеним переліком критеріїв заносилися до протоколу, а потім порівнювалися.

Перелік засобів вимірювальної техніки, що застосовуються під час проведення вогневих експериментальних досліджень та їх характеристики

наведено в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Засоби та вимірювальна техніка для підготовки вогневих досліджень

№ з/п	Найменування ЗВТ	Характеристика	Вимірювання в діапазоні	Клас точності та похибка ЗВТ
1.	Гнучка вимірювальна рулетка	лінійні розміри	від 0 до 3000 мм	2 клас точності, $\Delta = \pm 1$ мм
2.	Температурний датчик (термопара)	температура	від 0 до 1200 °С, від 0 до 333 °С, від 334 °С до 1200 °С	$\Delta = \pm 2,5$ °С, $\Delta = \pm 0,0075 \cdot T_{\text{вим}}$
3.	Секундомір	час	від 0 до 60 с, від 60 с до 3600 с	2 клас точності, $\Delta = \pm (0,4 \cdot \tau_{\text{вим}} / 60)$ с, $\Delta = \pm (0,4 + 1,5 \cdot (\tau_{\text{вим}} - 60) / 3540)$
4.	Обчислювально-вимірювальна система	температура	від 0 до 1100 °С	$\Delta = \pm 0,6$ %
5.	Термогігрометр	температура; вологість	від 0 до 50 °С, від 2% до 98%	$\Delta = \pm 0,5$ °С, $\Delta = \pm 3$ %
6.	Барометр-анероїд	атмосферний тиск	від 600 мм.рт.ст. до 800 мм.рт.ст.	$\Delta = \pm 1$ мм рт. ст.,
7.	Мірна ємність	об'єм	від 0 до 10 дм ³	$\Delta = \pm 0,05$ дм ³
8.	Анемометр	швидкості потоку повітря	від 0,3 м/с до 7 м/с	$\Delta = \pm 0,5$ м/с

Для проведення експериментальних досліджень допускається використання альтернативних видів ЗВТ з метрологічними характеристиками кращими ніж ті, які наведено в таблиці 4.1.

Загальна методологія натурних вогневих досліджень має наступну послідовність. На першому етапі здійснюється монтаж фрагменту фасадної системи з врахуванням проектної технології її кріплення. Здійснюється перевірка її цілісності та відповідності геометричним вимогам. Також, до протоколу заносяться дані щодо умов навколишнього середовища, зокрема атмосферний тиск, вологість повітря, температура навколишнього середовища, швидкість вітру. На конструкцію Установки влаштовується дослідний зразок протипожежного карнизу та фіксується. Улаштовуються засоби вимірювальної

техніки, а саме температурні датчики, а також на відстані 5 м від установки тепловізор. Для перевірки всіх термопар оператором проводиться контрольне вимірювання і реєстрація початкових значень температур.

Безпосередньо перед початком натурних вогневих досліджень встановлюється деко модельного вогнища пожежі класу 34В у вогневій Установки та заливається паливо у кількості не менше 30 л. Наливати воду в деко для вирівнювання рівня дзеркала палива не допускається, оскільки під час горіння великої кількості палива відбувається кипіння води та як наслідок збільшення її об'єму, що супроводжується виливом палива за межі дека. Готуються первинні засоби пожежогасіння (не менше двох порошкових вогнегасники ВП-9) та перевіряється захисний одягу оператора, який проводить вогневі роботи.

Фото-відеозапис запис процесу досліджень та вимірювання температури на поверхні фасаду інформаційно-вимірювальною системою, а також тепловізором відбувається за 30 секунд перед запаленням вогнища пожежі факелом. Тривалість вогневих досліджень складає не менше 30 хвилин, за умови збереження цілісності зразку протипожежного карнизу, який досліджується. Після повного вигорання палива та завершення вільного горіння модельного вогнища пожежі за командою керівника досліджень вимикаються засоби вимірювальної техніки. Оператор вогневих робіт, не повинен підходити до дека модельного вогнища не менше 10 хвилин після його затухання. Не допускається подавання води в осередок вогнища пожежі класу В. Оператором вимірювальної техніки проводиться збереження отриманих експериментальних даних на комп'ютерній техніці, а також на фото-відеоапаратурі. Заповнюються протоколи досліджень. Дослідження щодо оцінки ефективності типу протипожежного карнизу проводяться не менше трьох разів для кожного типу фасадної протипожежної перешкоди.

Для оцінки ступеня розсіювання значень випадкової величини температури відносно її математичного сподівання та мінливості вибірки

обчислюється її середнє квадратичне відхилення за результатами кожної серії досліджень:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (4.1)$$

де: \bar{x} – середнє арифметичне значення для вибірки; n – кількість значень у вибірці; i -й елемент у вибірці (наприклад, перше значення – x_1 , друге – x_2 і так далі); Σ – сума всіх значень отриманих від x_1 до x_n .

Під час проведення натурних вогневих досліджень слід дотримуватися вимог безпеки [189], а також інструкціями, що визначають вимоги до безпеки праці безпосередньо на робочому місці. Під час проведення вогневих досліджень серед персоналу, має бути присутня особа, яка відповідає за охорону праці. До проведення вогневих робіт мають допускатися особи, які пройшли інструктаж з охорони праці, знають методику проведення досліджень та отримали інструктаж з уточненням функцій кожного учасника досліджень.

4.2. Проведення експериментальних досліджень з визначення відносної ефективності протипожежних карнизів та аналіз отриманих результатів

В основі ідеї даного етапу експериментальних досліджень закладався підхід, щодо перевірки попередньо виявленої ефективності протипожежного карнизу з формою «вінглету» під час комп'ютерного моделювання зовнішньої поширення пожежі по висоті фасаду виконаного з негорючих матеріалів [108].

Під час проведення натурних вогневих досліджень розглядалося три випадки поширення зовнішньої пожежі, а саме:

- поширення пожежі уздовж висоти фасаду, який не обладнано протипожежним карнизом;
- поширення пожежі вздовж висоти фасаду, що обладнаний прямим протипожежним карнизом шириною 0,3 м;
- поширення пожежі вздовж висоти фасаду, що обладнаний

протипожежним карнизом з формою «вінглету» шириною 0,3 м.

На рисунку 4.4 наведено фото підготовленої установки для прогнозування поширення пожежі для кожної визначеної серії досліджень.



Рисунок 4.4 – Зовнішній вигляд Установки підготовленої до натурних вогневих досліджень, де: а – фрагмент фасаду не обладнаний протипожежним карнизом; б – фрагмент фасаду обладнаний прямим протипожежним карнизом; в – фрагмент фасаду, що обладнаний протипожежним карнизом з формою «вінглету».

Кожна серія натурних вогневих досліджень проводилася за подібних умов погоди, температури навколишнього середовища, відсутності атмосферних опадів та однакової пожежної навантаги модельного вогнища пожежі класу В. Під час проведеної серії вогневих досліджень не спостерігалось займання будівельних матеріалів, втрата їх цілісності або деформація несної конструкції протипожежного карнизу.

На рисунку 4.5 наведено фото фрагменту випробувань та температурні розподіли зафіксовані за допомогою тепловізора для фасаду не обладнаного протипожежним карнизом.



Рисунок 4.5 – Фото фрагменту досліджування поширення пожежі по фасаді, що не обладнаний протипожежним карнизом, а також зафіксовані температурні розподіли.

На основі отриманих даних термопар, що фіксували температурний режим ззовні досліджуваного фрагменту фасаду побудовано графіки динаміки температурного режиму на його поверхні протягом визначеного часу. На рисунку 4.6 наведено побудований графік температурних кривих.

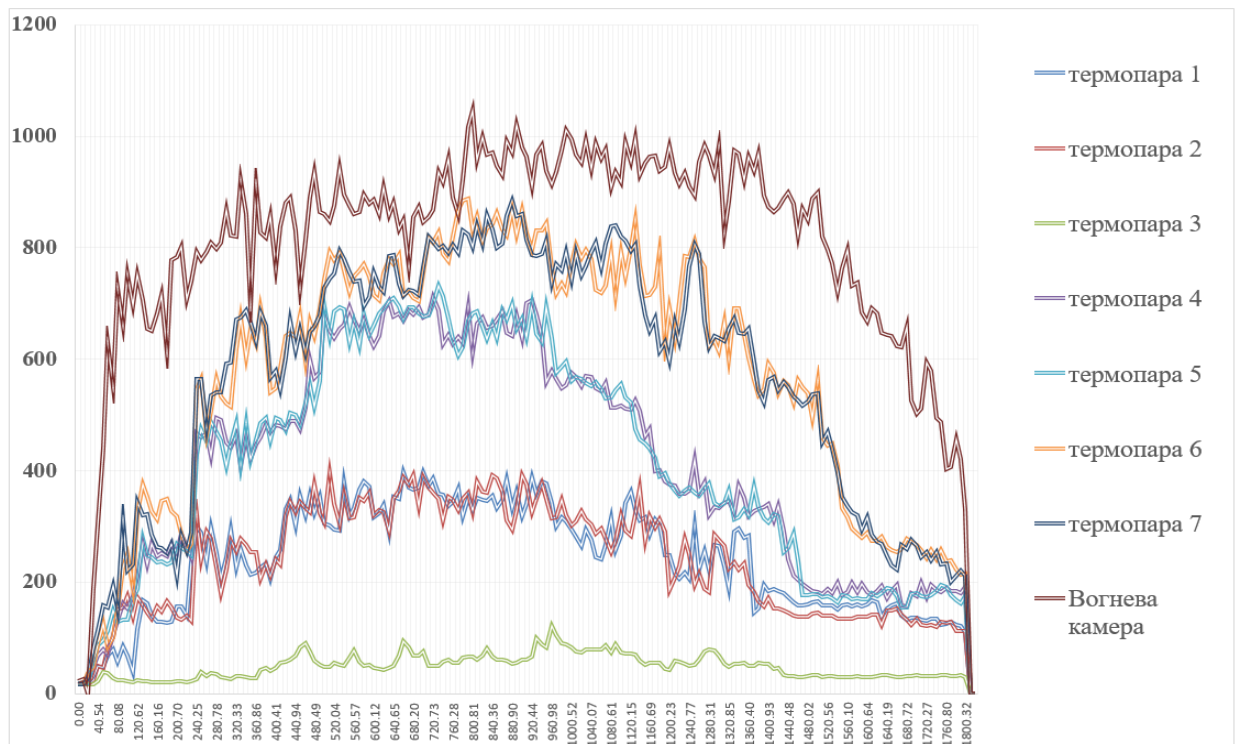


Рисунок 4.6 – Графік динаміки температури біля поверхні досліджуваного фрагменту фасаду.

Під час даного етапу досліджень встановлено, що полум'я вільно поширювалося на вище розташований поверх, зокрема на рівні його вікна температура на поверхні фасаду становила в межах 400-500°C упродовж фактично всієї тривалості вогневих досліджень. Полум'я мало безпосередній контакт з поверхнею фасаду по всій його довжині, при цьому площа його критичного прогріву склала в межах 73-82% від загальної площі досліджуваного фрагменту фасаду, а саме 4,5 м².

Порівнюючи отримані дані з результатами комп'ютерного моделювання свідчать, що за показником площі критичного прогріву середня похибка за результатом серії трьох вогневих досліджень не перевищила 8%, що є прийнятним для даного масштабу фрагменту фасаду та кількості супутніх чинників, які впливають на відтворюваність експерименту.

Результати натурних вогневих досліджень фасаду, що обладнаний прямим протипожежним карнизом шириною 0,3 м та фото фрагментів температурних розподілів зафіксовані за допомогою тепловізора наведено на рисунку 4.7.

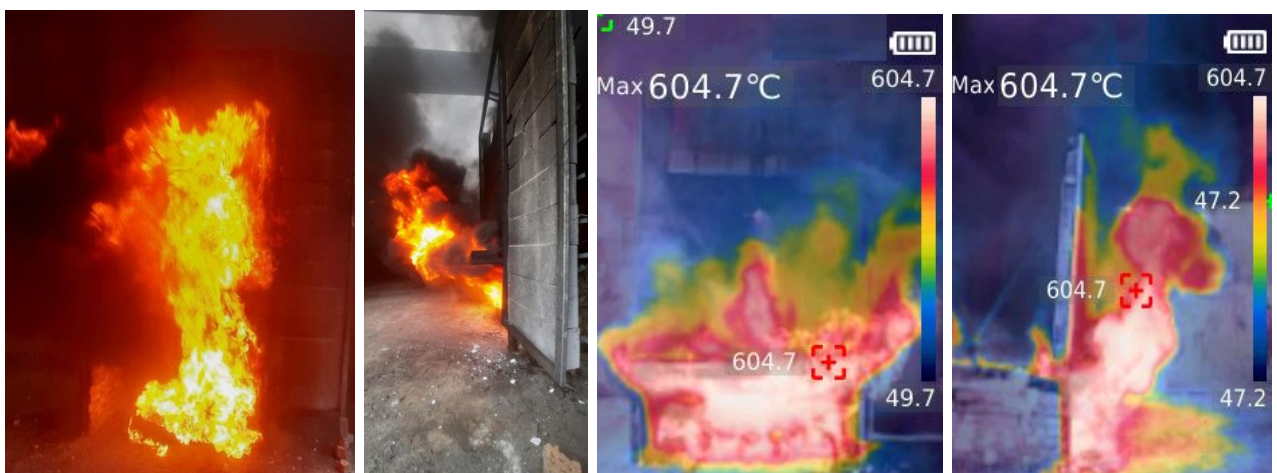


Рисунок 4.7 – Фото фрагменту досліджування поширення пожежі по фасаду, що обладнаний прямим протипожежним карнизом шириною 0,3 м, а також зафіксовані температурні розподіли на поверхні фасаду.

Під час даного етапу досліджень встановлено, що полум'я обмежено поширювалося на вище розташований фрагмент фасаду, зокрема на рівні розміщення вікна температура на поверхні фасаду становила в межах 210-250 °С упродовж фактично всієї тривалості досліджень. Разом із тим, на висоті фасаду в межах 0,3-0,7 м температура становила в межах 400-450 °С, зокрема в зоні де полум'я мало безпосередній, але короткочасний контакт з поверхнею фасаду. Площа критичного прогріву фасаду склала в межах 50-58% від всієї площі досліджуваного фрагменту фасаду. Полум'я пожежі поширювалася із значними завихреннями, проте сам температурний режим у вогневій камері та в досліджуваних зонах фасаду були стабільними.

Тобто, в разі застосування у якості фасадних протипожежних перешкод (протипожежних карнизів) прямокутних виступів або багатогранних виступів загального прямокутного профілю, можливо створити зону найменшої швидкості від початкового імпульсу та максимального тиску поза зоною фасадної площини та уникнути утворення точки повторного приєднання полум'я в зоні самого фасаду. Це сприяє зменшенню інтенсивності теплового впливу на поверхню фасаду та обмеженню поширення полум'я на вище розташовані елементи будівлі. У таких умовах знижується ймовірність вторинного займання облицювальних матеріалів і елементів фасадної системи. Крім того, формується більш передбачуваний характер руху гарячих газів, що підвищує ефективність локалізації пожежі. Таким чином, оптимізація геометричних параметрів протипожежних карнизів є важливим чинником підвищення рівня пожежної безпеки будівель.

На рисунку 4.8 наведено графік динаміки температури біля поверхні досліджуваного фрагменту фасаду, який обладнано протипожежним карнизом прямої форми.

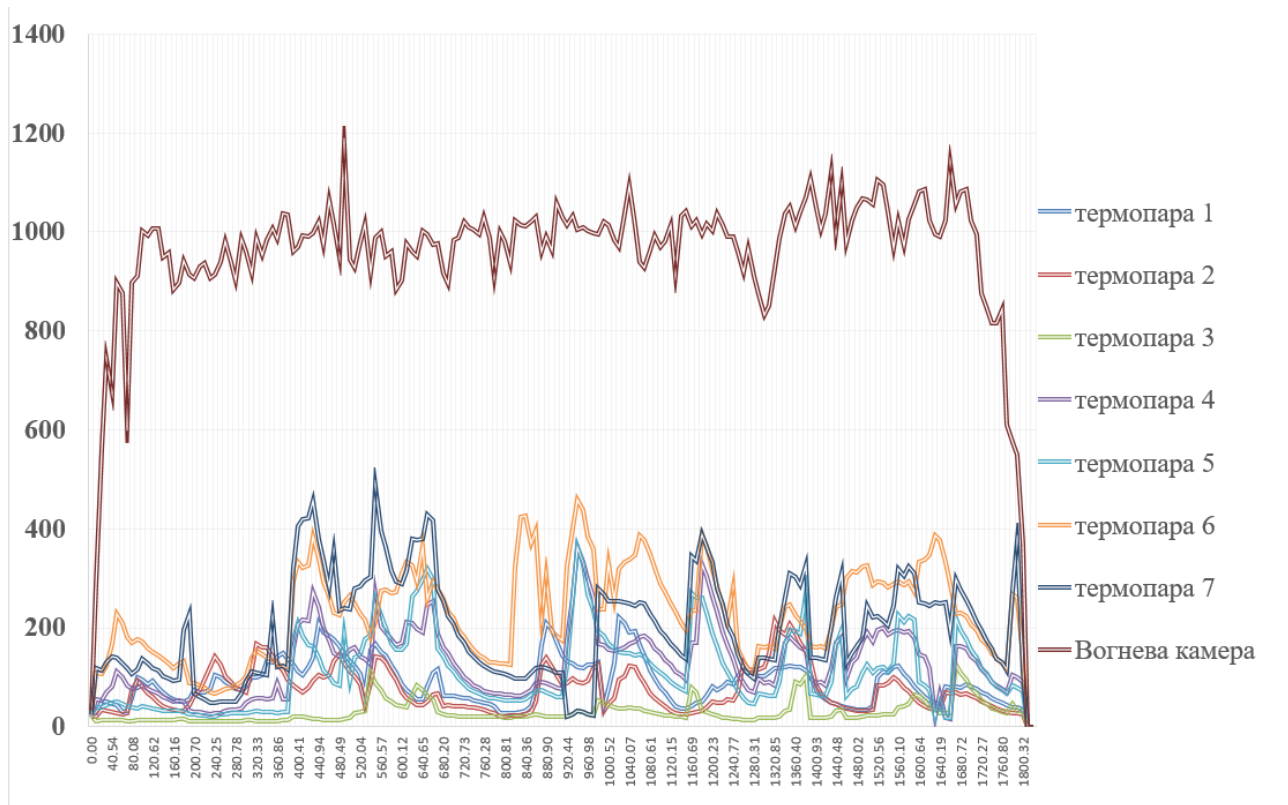


Рисунок 4.8 – Графік динаміки температури біля поверхні досліджуваного фрагменту фасаду який обладнано протипожежним карнизом прямої форми шириною 0,3.

Порівнюючи отримані дані з результатами попереднього комп'ютерного моделювання свідчать, що за показником площі критичного прогріву середня похибка за результатом серії трьох вогневих досліджень не перевищила 14 %, що є прийнятним для даного масштабу фрагменту фасаду та кількості супутніх чинників, які впливають на відтворюваність експерименту [109-110]. Збільшення значення похибки для даного етапу досліджень можливо пояснити турбулентним режимом поширення пожежі в нижній зоні фасаду через наявність протипожежної перешкоди необтічної форми, про що свідчать дані кривих динаміки температури для термопар 1-7.

Результати натурних вогневих досліджень фасаду, що обладнаний протипожежним карнизом шириною 0,3 м у формі «вінглету» та фото температурних розподілів на поверхні фасаду, зафіксовані за допомогою тепловізора наведено на рисунку 4.9.

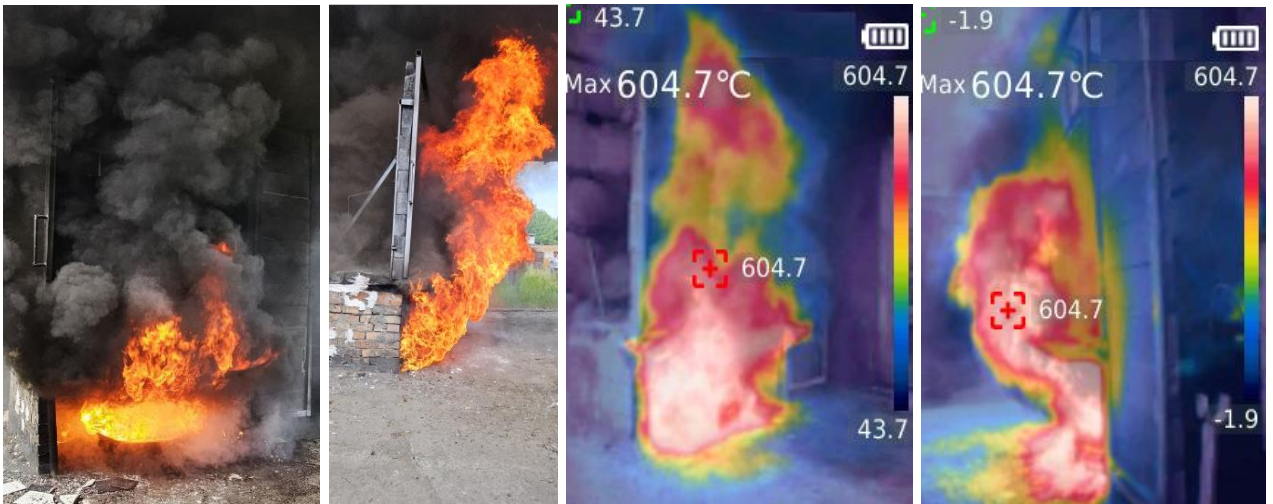


Рисунок 4.9 – Фото фрагменту досліджування поширення пожежі по фасаді, що обладнаний протипожежним карнизом шириною 0,3 м у формі «вінглету», а також зафіксовані температурні розподіли.

Під час даного етапу досліджень встановлено, що полум'я обмежено поширювалося на вище розташовану ділянку фасаду, зокрема до рівня його вікна температура на поверхні фасаду становила в межах 120-160 °С упродовж фактично всієї тривалості вогневих досліджень. Разом із тим, на висоті фрагменту фасаду в межах 1,7-2,2 м температура становила в межах 550-600 °С, зокрема в зоні де полум'я мало безпосередній постійний контакт з поверхнею фасаду. Площа критичного прогріву фасаду склала в межах 20-25% від всієї площі досліджуваного фрагменту фасаду, що свідчить про досить ефективне відведення полум'я від площини фасаду. Разом із тим, постійний контакт полум'я з поверхнею фасаду на рівні 1,7-2,2 м свідчить про явище повторного приєднання полум'я до фасаду фактично в зоні розташування вікна вищого поверху, що створює умови для швидкого руйнування світлопрозорі конструкції та поширення пожежі в середину приміщення даного поверху. На рисунку 4.10 наведено графік динаміки температури біля поверхні досліджуваного фрагменту фасаду, який обладнано протипожежним карнизом у формі «вінглету» шириною 0,3 м.

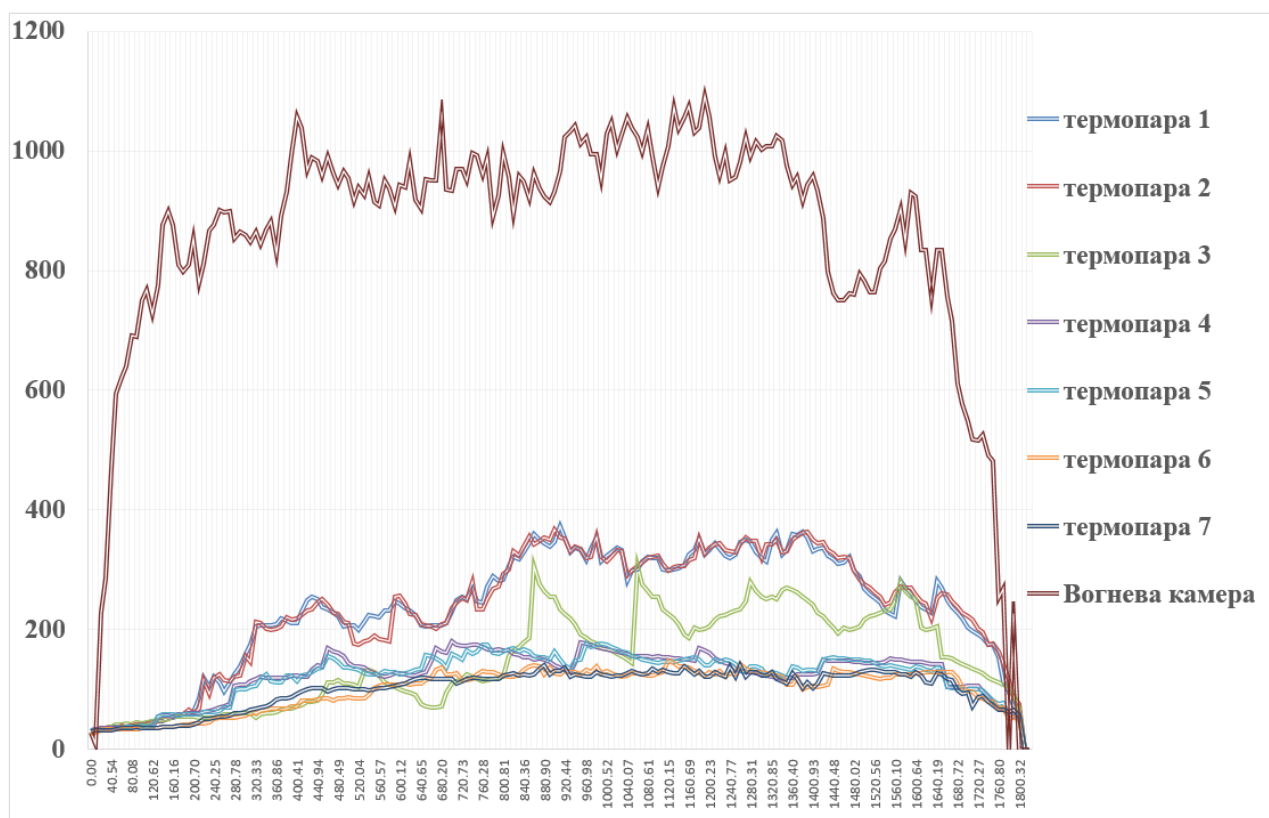


Рисунок 4.10 – Графік динаміки температури біля поверхні досліджуваного фрагменту фасаду який обладнано протипожежним карнизом у формі «вінглету» шириною 0,3 м.

Отримані експериментальні дані, дозволили продемонструвати відносну ефективність фасадного протипожежного карнизу у формі «вінглету» щодо зменшення площі критичного прогріву фрагменту вертикального фасаду у порівнянні із стандартним протипожежним карнизом прямої форми. Також, даний тип фасадної протипожежної перешкоди ефективний для захисту обмеження поширення пожежі на покрівлю будівлі, оскільки дозволяє створити зону в межах до 1,4 м висоти, де значення температури від дії пожежі не перевищує 200 °C. Окрім цього, характер побудованих температурних кривих свідчить, що застосування протипожежного карнизу даного типу робить характер висхідного потоку менш турбулентним у порівнянні із застосуванням прямого протипожежного карнизу, та відповідно зменшує ризик поширення пожежі у внутрішній простір вище розташованого поверху, зокрема через

відкриті світлові прорізи.

Разом із цим, протипожежний карниз у формі «вінглету» шириною до 0,3 м має недолік, який значно може вплинути на можливість поширення пожежі між вертикальними протипожежними відсіками, оскільки виявлений ефект повторного приєднання полум'я на висоті фасаду в межах 1,7-2,2 м створює в даній зоні температуру в межах 550-600 °С, яка перевищує значення температури, коли фасад не обладнаний протипожежним карнизом. Виявлений ефекти слід враховувати під час забезпечення обмеження поширення пожежі в будівлі з врахуванням її різних функціональних зон.

Слід відзначити, що матеріал оздоблення фасаду або конструкції фасадної системи може значно впливати на характер поширення пожежі, а відповідно впливатиме на ефективність її обмеження [111]. Також, в роботі [112] детально розкрито закономірності впливу конструктивних параметрів фасадів будівель на закономірності можливого поширення пожежі та прогнозування шляхів її ефективного обмеження. Таким чином, отримані результати дозволять більш комплексно забезпечувати основну вимогу Закону України «Про надання будівельної продукції на ринку» [1] в частині забезпечення обмеження поширення пожежі в будівлі, а також дотримуватися виконання вимог Закону України «Про будівельні норми» [113] в частині реалізації параметричного методу нормування, який передбачає визначення цілей та/або параметрів безпеки, функціональності та якості об'єкта нормування у будівництві.

Узагальнений графік температурних даних для зовнішньої поверхні вище розташованої стіни захищеної протипожежними карнизами різних типів від дії пожежі наведено на рисунку 4.11.

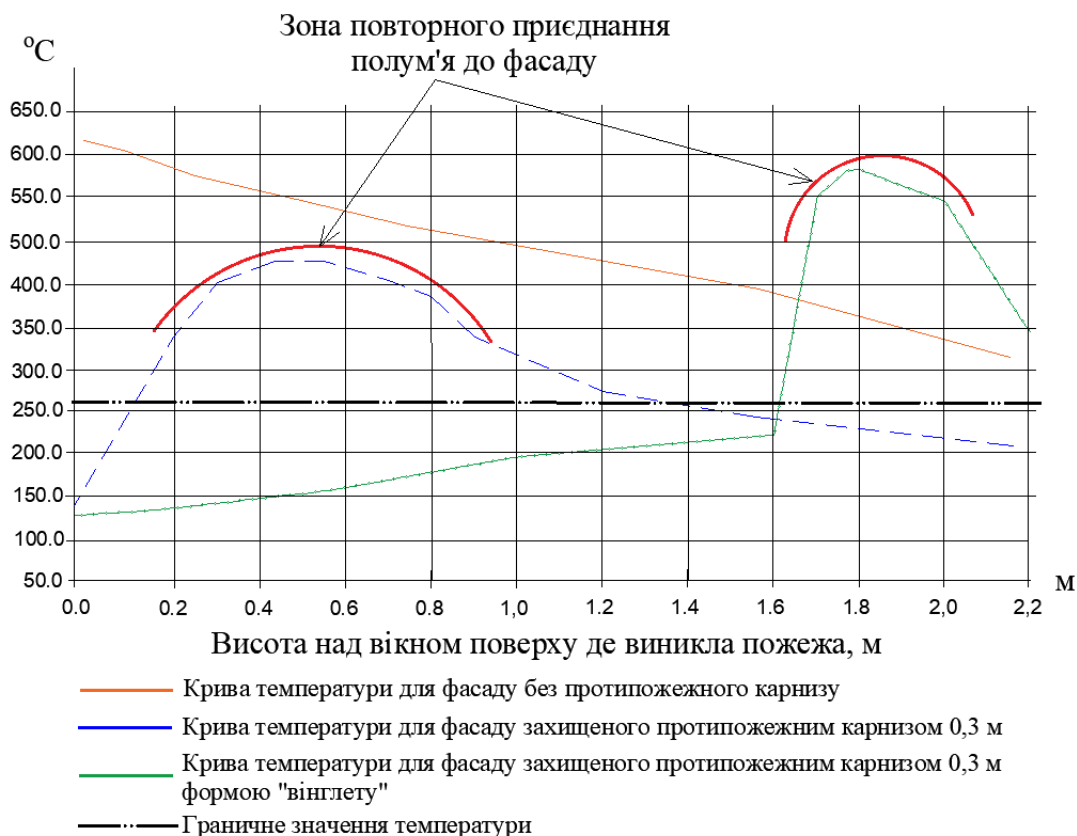


Рисунок 4.11 – Графік температурних даних для зовнішньої поверхні вище розташованої стіни захищеної протипожежними карнизами різних типів.

Аналіз графіку демонструє, що фасадний протипожежний карниз з формою «вінглету», окрім зменшення площі критичного прогріву фрагменту вертикального фасаду у порівнянні із стандартним протипожежним карнизом прямої форми, має значно меншу площу зони повторного приєднання полум'я до фасаду. Разом із цим, висота розміщення даної зони зміщується вгору по вертикалі на висоту в межах 1,6-2,2 м, що є небезпечним з точки зору можливості поширення пожежі на вище розташований поверх через світлові прорізи у зовнішній огорожувальній конструкції.

Отримані дані дозволяють змінити уявлення про вплив конструктивних параметрів фасадних протипожежних перешкод на процеси обмеження поширення пожежі зовнішнім вертикальним конструкціям, а також систематизувати дані щодо ефективності застосування окремих типів протипожежних карнизів.

4.3. Оцінювання ефективності обмеження поширення пожежі протипожежним карнизом із застосуванням параметричного методу на прикладі об'єкту будівництва

4.3.1. Загальна характеристика об'єкту дослідження

Під час проведення оцінювання ефективності обмеження поширення пожежі протипожежним карнизом із застосуванням параметричного методу на прикладі об'єкту будівництва обрано 16 поверхову висотну громадську будівлю із двома вертикальними секціями, які розташовані симетрично відносно основного фасаду. З 1-14 поверхи знаходяться житлові приміщення, 15-16 поверхи є технічними. Будівля відноситься до I ступеню вогнестійкості згідно з ДБН В.1.1-7:2016 [3], таким чином, згідно з вимог будівельних норм [3] фасадна система виконана з негорючих матеріалів та має негорюче облицювання зовнішньої поверхні. Заповнення світлових прорізів (конструкції вікон) мають розміри 1,5 м в ширину та 1,8 м у висоту, при загальній висоті поверху 3,0 м. Товщина міжповерхового перекриття складає 0,35 м та виконана із монолітного залізобетону з класом вогнестійкості REI 60. Будівля обладнана системою пожежної сигналізації та системою внутрішнього протипожежного водопроводу, розміщеного на сходовій клітці на кожному поверсі. Площа кожної квартири в межах поверху, що відокремлена протипожежними перешкодами складає 85 м².

Теплофізичні характеристики матеріалів і речовин використаних під час оцінювання поширення зовнішньої пожежі приймають на основі даних наведених у довідникових виданнях, зокрема [114] або за експериментальними даними отриманих під час натурних (лабораторних) вогневих досліджень.

Під час проведення оцінювання допускається робити такі припущення:

- температуру полум'я пожежі приймають однаковою по всій поверхні горіння в приміщенні;
- температуру речовин або матеріалів, які сприймають тепло від пожежі,

в початковий момент розрахунку приймають рівною 20 °С;

- приймають такі умови навколишнього середовища: температура повітря 5 °С, атмосферний тиск 1 атм, швидкість вітру 3 м/с, вологість повітря 80 %;

- тепловий вплив від пожежі використанням рівняння променистого теплообміну та рівняння нестационарної теплопровідності визначають за рахунок теплового випромінювання, конвективну складову в даному випадку допускається не враховувати;

- ступінь чорноти полум'я (ϵ_f) приймають рівними $\epsilon_f=1$, а ступінь чорноти поверхні матеріалу або речовини, які сприймають тепло від пожежі на об'єкті (ϵ_m) приймають рівними $\epsilon_m=0,8$, як для деревини;

- причину виникнення пожежі – недотримання правил поведження (експлуатації) електричних приладів.

Пожежне навантаження, що входить до складу приміщення площею 80 м²:

- гумові вироби – 20 кг (нижча теплота згоряння 33,52 МДж/кг);
- полімерні матеріали – 150,0 кг (нижча теплота згоряння 24,3 МДж/кг);
- пінополіуритан – 15 кг (нижча теплота згоряння 47,14 МДж/кг);
- целюлозні вироби – 5 кг (нижча теплота згоряння 13,4 МДж/кг);
- штучна шкіра – 20 кг (нижча теплота згоряння 17,76 МДж/кг);
- дерев'яні вироби – 150 кг (нижча теплота згоряння 14,5 МДж/кг);
- віскоза – 25 кг (нижча теплота згоряння 8,2 МДж/кг).

В основі вихідних даних щодо моделювання розрахункової пожежі передбачена наявність в конструкції Об'єкту матеріалу монолітного бетону з наступними фізичними характеристиками:

- густина 1950 кг/м³;
- питома теплоємність 1,04 кДж/(кг·К)
- коефіцієнт випромінювання 0,9;
- коефіцієнт поглинання 0,65 1/м.

На рисунку 4.12 наведено зовнішній вигляд пожежної навантаги в

середині приміщення, де моделюється розрахункова пожежа.

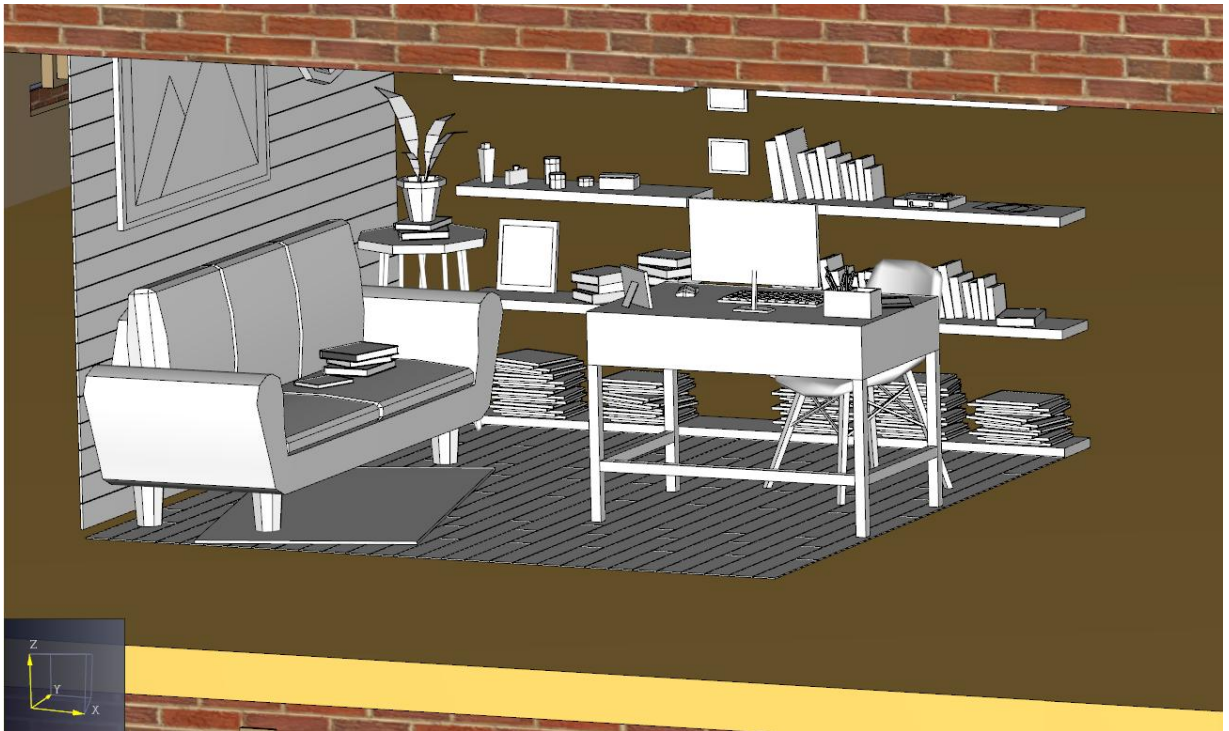


Рисунок 4.12 – Модель пожежної навантаги в середині приміщення квартири.

Також, в конструкції будівлі наявна цегла з густиною 1900 кг/м^3 , питома теплоємність $0,8 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$ та теплопровідністю $0,65 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$. Світлові прорізи (вікна) будівлі заповнені склом, густиною 2270 кг/м^3 , з питомою теплоємністю $0,66 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$ та теплопровідністю $0,063 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$. Густина сталі 7780 кг/м^3 , питома теплоємність $0,48 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$ та теплопровідністю $15,0 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, коефіцієнт випромінення $0,85$.

Критична температура займання суміжних матеріалів прийнята $280 \text{ }^\circ\text{C}$, як для матеріалу з найменшим значенням температури самозаймання, а саме полімерні матеріали, що знаходяться в середині приміщення квартири.

Крок розрахункової сітки FDS моделі складає 25 см^2 , що обумовлено геометричними розмірами моделі фрагменту будівлі та кратності розміру комірки сітки відносно геометричних параметрів досліджуваних об'єктів.

На рисунку 4.13 наведено зовнішній вигляд моделі будівлі.



Рисунок 4.13 – Модель будівлі, для оцінювання ефективності протипожежних перешкод за параметричним методом.

Променистий теплообмін включений у розрахункову модель за допомогою розв'язку рівняння переносу випромінювання для сірого газу і для деяких обмежених випадків, з використанням широкодіапазонної моделі. Рівняння вирішується за допомогою методу, аналогічного методу контрольних об'ємів для конвективного переносу (FVM). Коефіцієнти поглинання сажею й димом обчислені за допомогою моделі RADCAL. Геометрія FDS вирішує основні рівняння на прямокутній сітці. Перешкоди зобов'язано бути прямокутними, щоб задовольняти параметри сітки.

Для побудови полів теплового утворення проводиться експертний вибір сценарію пожежі, при якому очікуються найгірші наслідки для людей та персоналу, які перебувають на об'єкті, а також враховує ризики для пожежно-рятувальних підрозділів під час ліквідації пожежі.

Параметричний метод обґрунтування ефективності фасадних протипожежних перешкод та зокрема протипожежних карнизів різної форми

при однаковій ширині виступу, передбачає можливість досягнення необхідного рівня безпеки із урахуванням усіх суттєвих характеристик об'єкта будівництва, і включає в себе аналіз можливої пожежі у будівлі за найнебезпечнішим сценарієм розвитку пожежі з подальшим розрахунком та математичним або фізичним моделюванням можливої пожежі.

4.3.2. Розрахунковий сценарій пожежі та результати моделювання

В рамках сценарію найбільш несприятливих умов виникнення та розвитку пожежі обрано випадок займання електропроводки від електричного приладу, пожежна навантага якого орієнтовно становить 420 кВт/м^2 із максимальною температурою горіння $740 \text{ }^\circ\text{C}$. В наслідок поширення пожежі по килиму займається диван розміщений в центрі кімнати та інші горючі предмети, які розташовані в кімнаті. Поширенню полум'я в середині Об'єкту відбувається вільно із швидкістю $0,015 \text{ м/с}$, згідно з рекомендаціями та дослідженнями [115-116]. Зменшення інтенсивності горіння (затухання) в середині та ззовні об'єкту відсутнє. Пожежа вільно розвивається у продовж всього часу моделювання та поширюється крізь відкриті світлові прорізи на фасад будівлі.

Вимірювачі в газовій фазі для вимірювання та контролю за температурним режимом розташовані безпосередньо біля поверхні фасаду, а також в зоні світлових прорізів вище розташованих поверхів. Температура прогріву стіни від впливу фасадної пожежі візуалізується безпосередньо на її поверхні. На рисунку 4.14 наведено місця, де розміщені вимірювачі температури в газовій фазі та фрагмент досліджуваного фасаду, який обладнано протипожежним карнизом прямокутної форми та у формі «вінглету» з виступом шириною $0,75 \text{ м}$ згідно з вимогами [6-8].

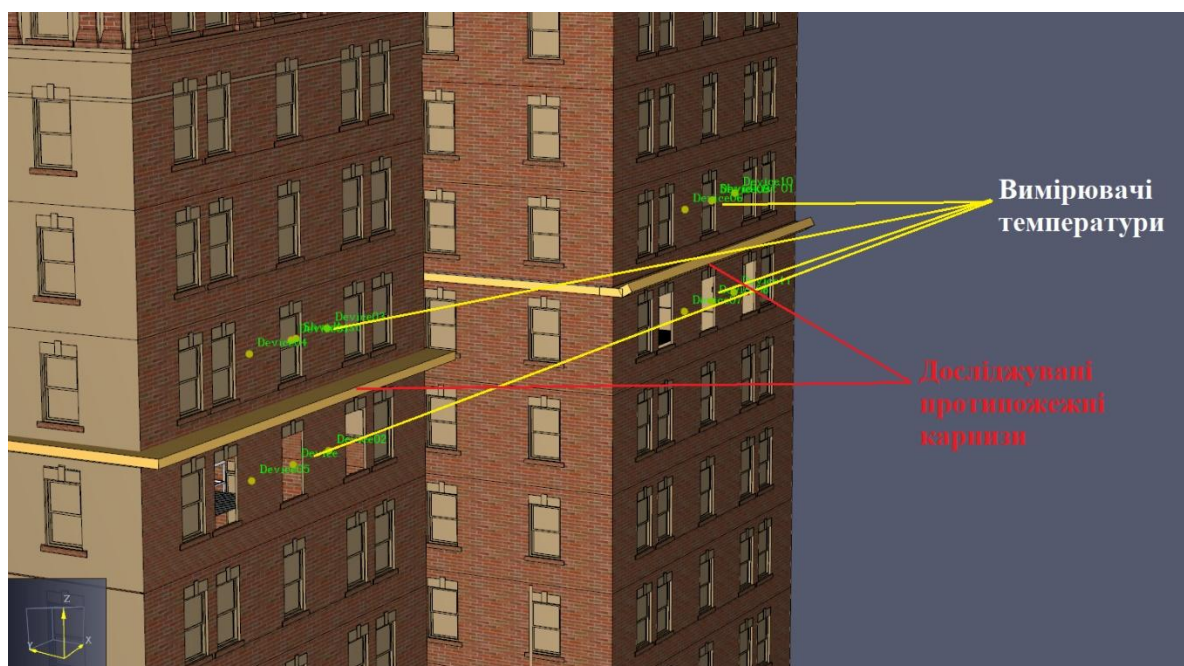


Рисунок 4.14 – Місця розміщення датчиків контролю температури та фасадні протипожежні карнизи.

Прийнято, що тривалість вільного горіння і відповідно розвитку пожежі складає не менше 600 секунд, що обґрунтовано часом нормативного прибуття пожежно-рятувальних підрозділів згідно з Постановою КМУ № 874 від 27 листопада 2013 р «Про затвердження критеріїв утворення державних пожежно-рятувальних підрозділів (частин) оперативно-рятувальної служби цивільного захисту в адміністративно-територіальних одиницях та переліку суб'єктів господарювання, де утворюються такі підрозділи (частини)». Також, додатково, до тривалості вільного розвитку пожежі додається 120 секунд, що імітує час розгортання пожежно-рятувальних підрозділів. Таким чином, загальний час проведення моделювання складає 720 с.

Результати моделювання за визначеним сценарієм виникнення та розвитку пожежі дозволили оцінити динаміку розвитку пожежі та її поширення ззовні фасаду у продовж всієї тривалості моделювання. За результатами розрахунків визначено значення щодо основних критеріїв, які характеризують небезпеку поширення пожежі, а саме температурні розподіли в зоні фасаду, який захищений протипожежними карнизами досліджуваних типів, швидкість

поширення теплого потоку від пожежі та тиск в зоні фасаду.

На рисунку 4.15 наведено візуалізацію розвитку пожежі на основі створеної моделі будівлі на 150 с; 300 с; 500 с та на 720 с моделювання.

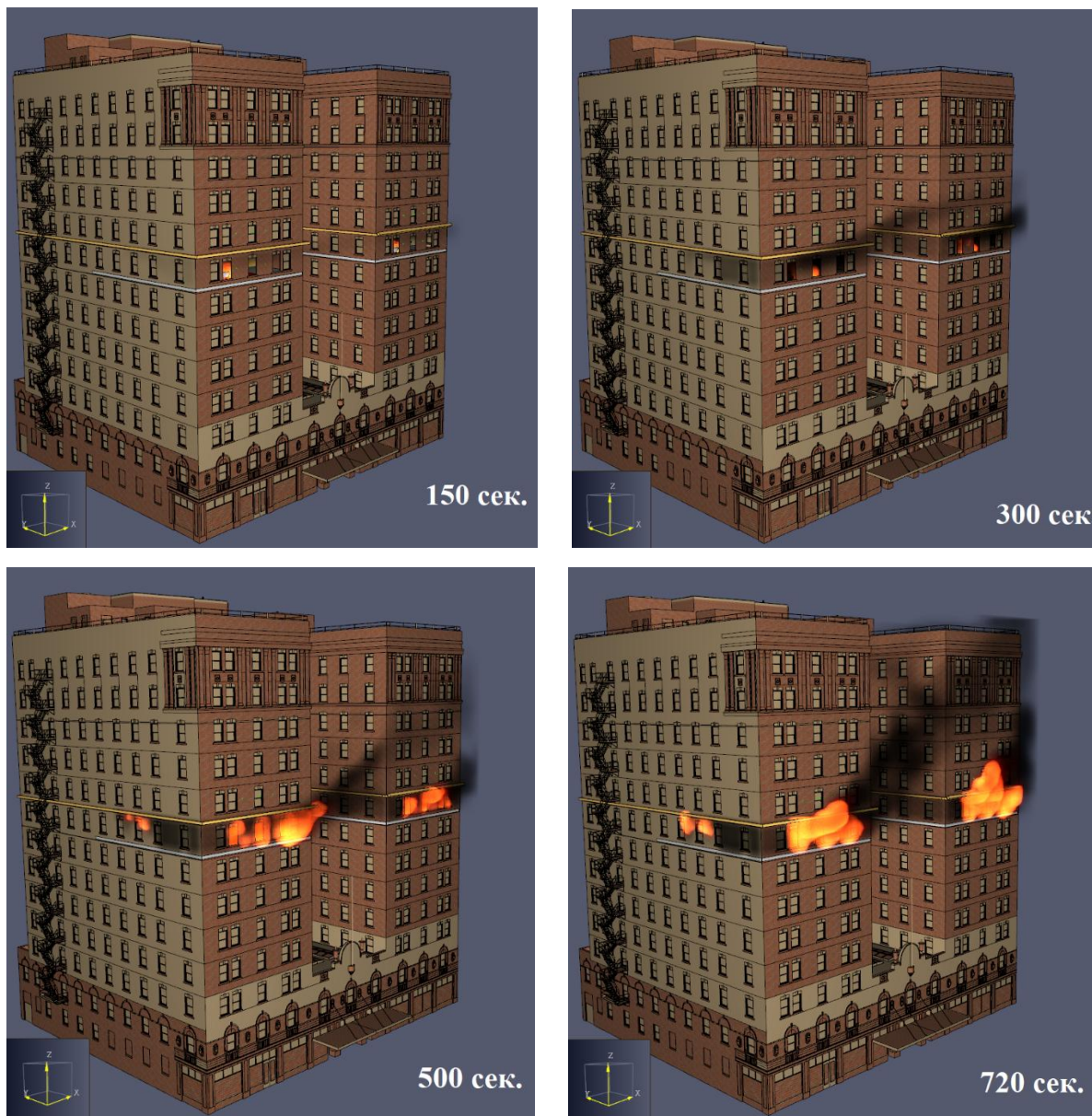


Рисунок 4.15 – Кінограма розвитку пожежі в моделі будівлі та її поширення ззовні фасаду.

За результатом аналізу розвитку пожежі визначено, що у продовж розрахункових 720 секунд пожежа поширилася на всю площу квартири, а також полум'я поширилося через світлові прорізи будівлі. На рисунку 4.16 наведено

візуалізацію процесу поширення полум'я на вище розташовані поверхи при застосуванні прямого протипожежного карнизу шириною 0,75 м та протипожежного карнизу у формі «вінглету» з аналогічною шириною виступу за межі фасаду.

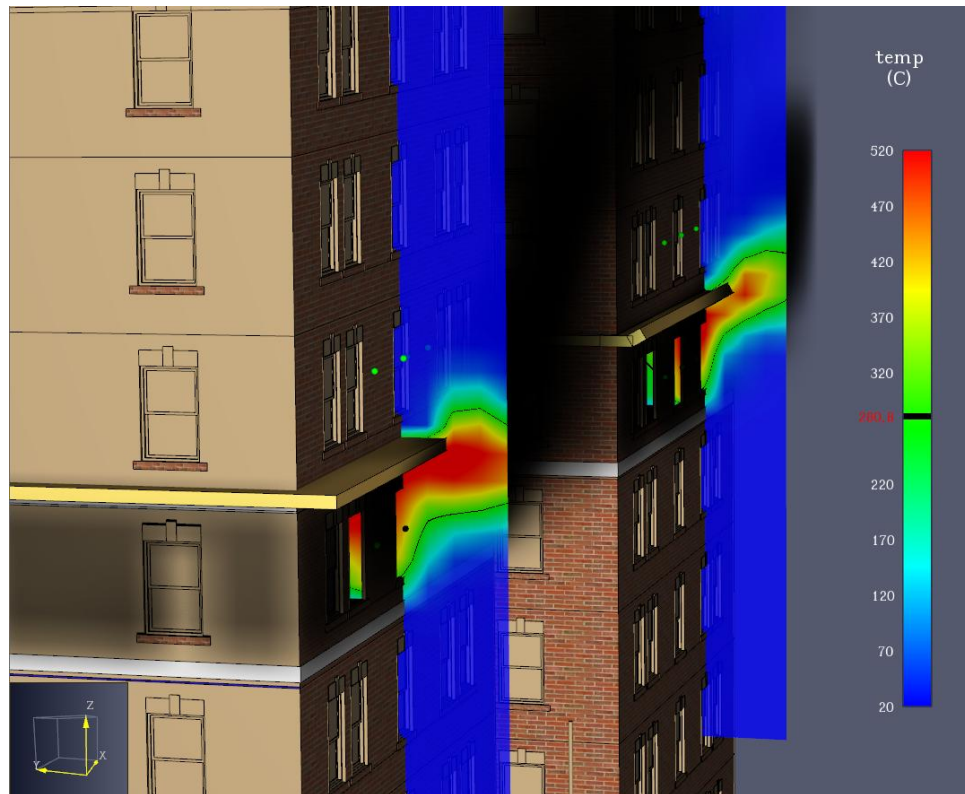
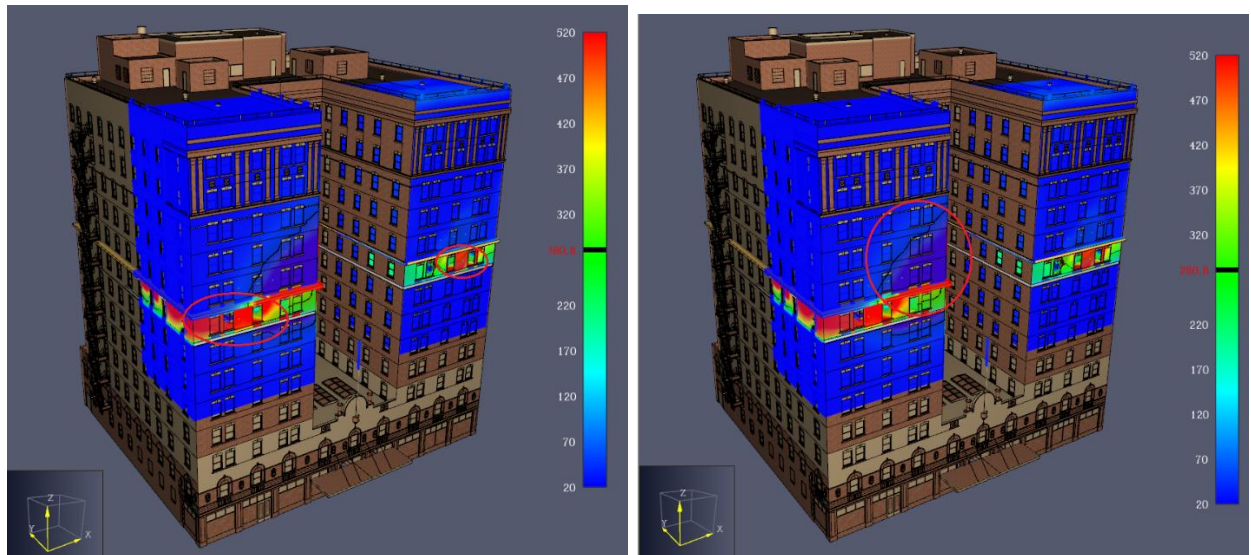


Рисунок 4.16 – Візуалізація характеру поширення теплового впливу від пожежі у зоні фасаду будівлі.

Аналіз отриманих даних дозволяє зробити висновок, що наявність карнизу обтічної форми, в даному випадку у формі «вінглету» дозволяє ефективно відводити тепло від пожежі та небезпечні чинники пожежі від фасаду будівлі тим самим перешкоджаючи її негативному впливу на вище розташовані поверхи. Окрім цього, відведення тепла у простір на рівні поверху моделювання пожежі дозволило зменшити температурний режим безпосередньо в зоні фасаду де пожежа поширюється крізь світловий проріз, що наведено на рисунку 4.17.



а)

б)

Рисунок 4.17 – Візуалізація температурних розподілів на поверхні фасаду будівлі, де (а) – зони утворення критичної температури на поверхні фасаду на рівні поверху де відбувається пожежа; (б) – зона утворення критичної температури на вище розташованому поверсі, який захищається протипожежним карнизом з прямим виступом.

За результатом проведеного моделювання встановлено, що протипожежний карниз у формі «вінглету» з шириною виступу 0,75 м у порівнянні із протипожежним карнизом прямої форми забезпечує ефективне відведення вогню та небезпечних чинників пожежі від захищеної площини фасаду. При цьому, нерівномірність температурних розподілів на поверхні фасаду обумовлена наявністю вітрового впливу в межах 3 м/с, що відповідає параметрам реальних пожеж згідно із дослідженнями [117-119]. За даних умов моделювання, площа критичного прогріву поверхні фасаду, який було захищено прямим протипожежним карнизом склала 115 м², при цьому критичний прогрів фасаду захищений протипожежним карнизом у формі «вінглету» не було зафіксовано у продовж всієї тривалості моделювання.

Ефект повторного приєднання полум'я до фасаду який захищений прямим протипожежним карнизом обумовлений наявністю зони підвищеного тиску в межах 40-50 Па в зоні фасаду, візуалізація утворення кого наведена на рисунку 4.18.

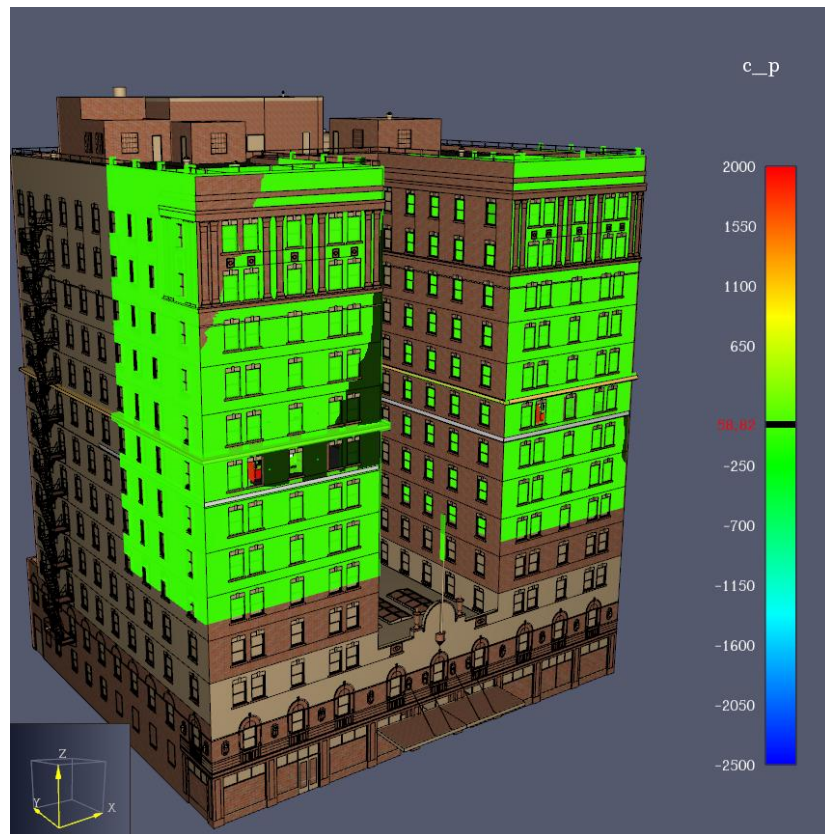


Рисунок 4.18 – Візуалізація місця утворення зони підвищеного тиску біля площини фасаду (виділено чорним контуром).

Приведені дані, щодо отриманих значень підвищеного тиску в зоні досліджуваного фрагменту фасаду свідчать, що для даної ділянки зовнішньої огорожувальної конструкції характерна висока ймовірність утворення ефекту повторного приєднання полум'я, що відповідно впливає на температурний режим в цій зоні та цілісність зовнішньої огорожувальної конструкції будівлі та заповнення світлових прорізів. Це створює додаткові ризики локального перегріву матеріалів фасаду та прискореного втрачання ними несучої та ізолювальної здатності. У результаті підвищується ймовірність руйнування елементів огорожувальної конструкції та подальшого поширення пожежі у внутрішній об'єм будівлі. На рисунках 4.19-4.20 наведено графіки температурних режимів в зоні фасаду на рівні поверхів, які знаходяться над досліджуваними типами протипожежних карнизів.

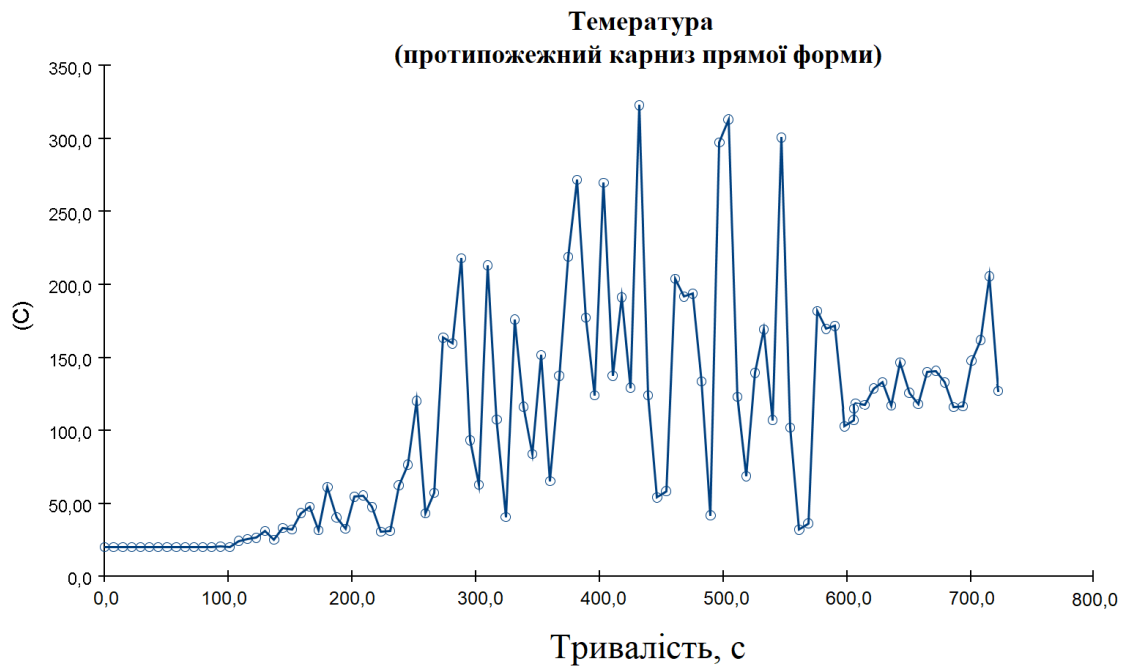


Рисунок 4.19 – Динаміка температури в зоні фасаду, що захищений протипожежним карнизом прямої форми.

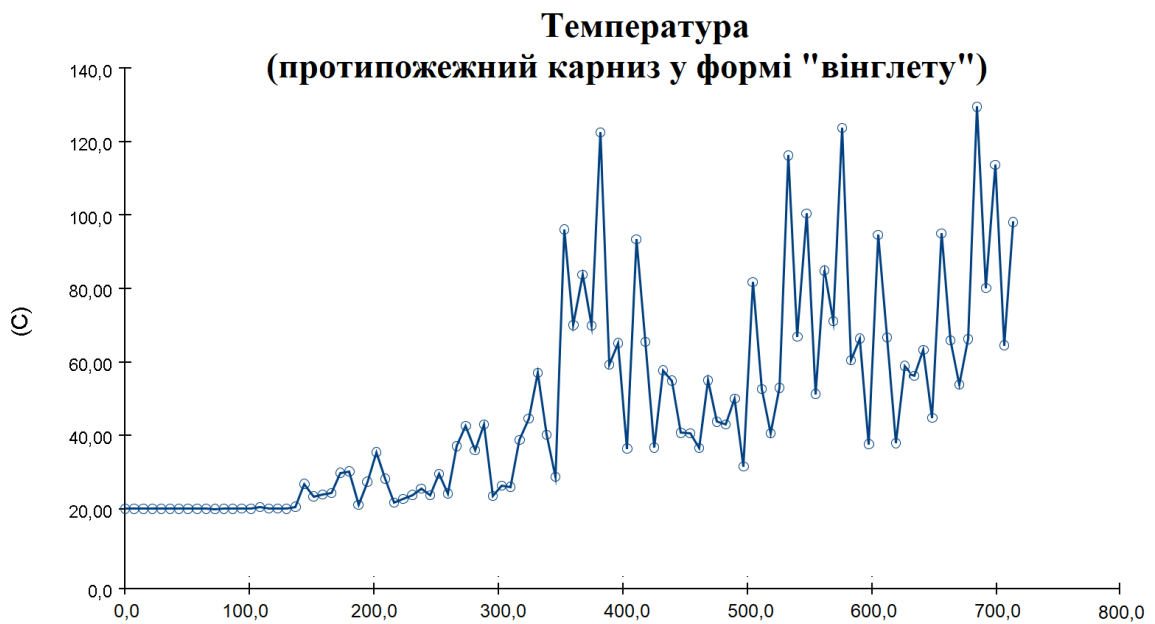


Рисунок 4.20 – Динаміка температури в зоні фасаду, що захищений протипожежним карнизом прямої форми.

Отримані результати свідчать, що протипожежний карниз у формі «вінглету» дозволяє знизити температурний вплив в середньому до 35% у

порівнянні з прямим протипожежним карнизом, при цьому для даного типу фасадної системи протипожежний карниз у формі «вінглету» дозволяє уникнути критичного прогріву фасаду у 250 °С, що задовольняє базові критерії умов безпеки під час оцінювання ефективності обмеження поширення фасадної пожежі фасадною протипожежною перешкодою.

4.4. Висновки до розділу

1. На основі проведеного критичного аналізу існуючих методик оцінювання заходів із запобігання поширенню зовнішньої пожежі, удосконалено програму-методику експериментальних вогневих досліджень. Розроблений підхід щодо оцінки ефективності протипожежного карнизу, інтегрованого у фасадну систему фрагменту будівлі, який враховує технологію монтажу, що дозволяє максимально точно відтворити реальні умови впливу пожежі під час натурних вогневих випробувань.

2. Теоретично обґрунтовано та методом натурних вогневих досліджень доведено, що в разі застосування протипожежних карнизів із багатограними виступами загального прямокутного профілю, можливо створити зону найменшої швидкості від початкового імпульсу та максимального тиску поза зоною фасадної площини, що забезпечує уникнення створення зони повторного приєднання полум'я в до площини фасаду.

3. На основі проведених натурних вогневих експериментальних досліджень встановлено, що фасадний протипожежний карниз з формою «вінглету», окрім зменшення площі критичного прогріву фрагменту вертикального фасаду у порівнянні із стандартним протипожежним карнизом прямої форми, до 50 % зменшує площу зони повторного приєднання полум'я до фасаду. Таким чином, даний тип фасадної протипожежної перешкоди є ефективною для захисту від поширення пожежі на покрівлю будівлі, оскільки дозволяє створити зону в межах до 1,4 м висоти, де значення температури від дії пожежі не перевищує 200 °С.

4. Експериментально доведено, що протипожежний карниз у формі «вінглету» шириною до 0,3 м має недолік, який значно впливає на можливість поширення пожежі між вертикальними протипожежними відсіками, оскільки виявлений ефект повторного приєднання полум'я на висоті фасаду в межах 1,7-2,2 м створює в даній зоні температуру в межах 550-600 °С, яка є критичною.

5. Розроблено експериментальну установку для дослідження процесів поширення пожежі по фасаді будівлі, що відтворює фрагмент фасаду з імітацією вогневого осередку реальної пожежі та можливістю встановлення протипожежних карнизів різних конструктивних типів.

6. На прикладі реальної будівлі із застосуванням методу комп'ютерного моделювання доведено, що конструктивні параметри протипожежних карнизів безпосередньо впливають на ефективність обмеження фасадної пожежі. При цьому встановлено, що для даного досліджуваного типу фасаду наявність карнизу у формі «вінглету» дозволило відвести тепло та інші небезпечні чинники пожежі від захищеної площини фасаду, зменшивши площу критичного прогріву на 115 м² у порівнянні із протипожежним карнизом прямої форми.

7. Порівняння отриманих даних з результатами комп'ютерного моделювання свідчать, що за показником площі критичного прогріву середня похибка за результатом серії трьох вогневих досліджень не перевищила 14 %, що є прийнятним для даного масштабу фрагменту фасаду та супутніх чинників, які впливають на відтворюваність експерименту. Наявність значного значення похибки для даного етапу досліджень в тому числі обґрунтовується турбулентним режимом поширення зовнішньої пожежі.

РОЗДІЛ 5. МЕТОДОЛОГІЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ОБМЕЖЕННЯ ПОШИРЕННЯ ЗОВНІШНЬОЇ ПОЖЕЖІ ПРИ ЗАСТОСУВАННІ ПРОТИПОЖЕЖНИХ КАРНИЗІВ РІЗНИХ ТИПІВ ТА ОЦІНКА ЇЇ ЕКОНОМІЧНОГО ЕФЕКТУ

У розділі представлено практичні рекомендації та економічне обґрунтування результатів роботи. Розроблено методологію підбору протипожежних карнизів для захисту різних функціональних зон будівлі та перешкоджання вертикальному поширенню полум'я ззовні фасаду. Сформовано основні підходи до оцінки ефективності, що поєднують розрахункові методи та натурні випробування, а завершальна оцінка економічного ефекту на прикладі об'єкта будівництва підтверджує доцільність впровадження запропонованих рішень.

5.1. Методологія підбору типу протипожежного карнизу для ефективного захисту функціональних зон будівлі

В основі методології підбору типу протипожежного карнизу для ефективного захисту різних функціональних зон будівлі закладається принцип забезпечення перешкоджання вільному вертикальному поширенню полум'я по фасаду будівлі, захисту верхніх віконних прорізів від дії теплового потоку та інших небезпечних чинників пожежі, а також локалізації пожежі в межах окремих поверхів для створення прийнятних умов ліквідації пожежі пожежно-рятувальними підрозділами.

На першому етапі вибору типу протипожежного карнизу слід визначити умовну висоту будівлі, що відповідно впливатиме на нормативне значення ширини його виступу, (0,3 м, 0,75 м чи 1,5 м). Також, в залежності від умовної висоти будівлі залежить кількість вертикальних протипожежних відсіків, та відповідно, зон влаштування протипожежних карнизів на фасаді. Якщо будівля будується за індивідуальною концепцією протипожежного захисту, то ширину

виступу визначають розрахунком або шляхом проведення натурних вогневих випробувань. Наступним етапом є визначення функціональної зони будівлі, яка захищається, а саме:

- вертикальна частина фасаду будівлі на межі протипожежних відсіків;
- стилобатна частина будівлі, в тому числі підземний паркінг;
- експлуатована покрівля, яка може використовуватись як елемент розміщення інженерних систем будівлі, які забезпечують її функціонування або рекреаційна зона відпочинку для мешканців (відвідувачів).

Під час вибору типу протипожежного карнизу для захисту фасаду будівлі слід враховувати питання інтеграції фасадної протипожежної перешкоди до конструкції фасадної системи будівлі. При цьому, тип фасадної системи та будівельні матеріали її конструкції і облицювання визначають не лише конструктивне рішення, а й умови надійного кріплення карнизу до несучих елементів. Особливо важливим є забезпечення сумісності матеріалів карнизу та фасаду з точки зору вогнестійкості, теплового розширення і довговічності. Крім того, монтажний вузол має гарантувати відсутність містків поширення вогню та запобігати утворенню зон концентрації теплових напружень. Необхідно також враховувати експлуатаційні навантаження, вплив атмосферних чинників і можливість технічного обслуговування конструкції. У результаті комплексний підхід до проектування дозволяє забезпечити ефективність протипожежного карнизу та його інтеграцію в загальну систему пожежної безпеки будівлі.

Наступним чинником, який впливатиме на процес вибору протипожежного карнизу є площа світлових прорізів та орієнтовне значення пожежної навантаги в середині приміщення. Слід розуміти, що площа вікна істотно впливає на процес поширення фасадної пожежі (швидкість та інтенсивність поширення), оскільки саме через віконні прорізи полум'я виходить із приміщення назовні і може поширюватися ввертикально по

зовнішнім фасадним конструкціям. Чим більша площа вікна — тим вища інтенсивність виходу полум'я, більша теплова дія на конструкцію фасадної системи і швидше вертикальне поширення пожежі.

Серед ключових чинників, які впливають на процеси поширення пожежі є тип матеріалу оздоблення фасаду [120-121]. Даний параметр матиме ключову роль під час прогнозування можливості займання фасаду, оцінювання потенційної швидкості поширення вогню по поверхні та потенційному тепловому випромінюванні. Найкращим методом отримання цих даних є проведення натурних експериментальних вогневих досліджень або хоча б лабораторних аналогів з фрагментами фасадних систем та відповідних будівельних матеріалів, які плануються до застосування в їх конструкції включаючи елементи кріплення.

Прогнозування масштабу можливого поширення пожежі не можливе без оцінювання часу прибуття пожежно-рятувальних підрозділів та часу на розгортання сил та засобів в зоні доступу до фасаду де відбувається пожежа. В свою чергу, навіть аналіз наявних джерел зовнішнього протипожежного водопостачання та її гідравлічних параметрів може вплинути на оцінювання тривалості можливого вільного поширення пожежі. Аналогічний аналіз варто проводити для системи внутрішнього протипожежного водопроводу та оцінювання ризиків пов'язаних із забезпеченням його належної експлуатації і підтримання працездатності. Крім того, необхідно враховувати доступність під'їздів до будівлі, можливість встановлення пожежної техніки та наявність перешкод, що можуть ускладнювати проведення оперативних дій. У сукупності ці чинники дозволяють більш обґрунтовано оцінити сценарії розвитку пожежі та визначити ефективність заходів із її локалізації і ліквідації. На рисунку 5.1 наведено загальну схему методології підбору типу протипожежного карнизу для ефективного захисту різних функціональних зон будівлі.



Рисунок 5.1 – Схема методологічного підходу щодо вибору типу протипожежного карнизу для ефективного захисту фасаду будівлі.

Дотримання даної методології дозволить ефективно здійснювати підбір необхідного типу протипожежного карнизу для ефективного захисту різних функціональних зон будівлі від поширення зовнішньої пожежі ззовні по фасаду будівлі.

5.2 Основні підходи оцінки ефективності протипожежних карнизів під час використання розрахункових методів та натурних вогневих випробувань

Здійснення оцінки ефективності фасадних протипожежних карнизів за допомогою моделювання в Fire Dynamics Simulator є одним із науково обґрунтованих підходів до перевірки їх впливу на розповсюдження пожежі по фасаді, що підтверджено в багатьох наукових працях. Разом із цим, неправильне використання сучасних математичних апаратів під час імітації пожежі на розрахунковому об'єкті може призвести до некоректного оцінювання поширення зовнішньої пожежі та, відповідно, оцінювання заходів щодо її обмеження і локалізації. Як один із прикладів, закладання неправильного алгоритму спрацювання систем протипожежного захисту, може значно вплинути на спрацювання систем та як наслідок вплинути на сценарій розвитку пожежі [122-123].

Серед ключових чинників, які впливають на здійснення такого оцінювання є:

- вибір розрахункового сценарію пожежі або декількох сценаріїв;
- моделювання пожежної навантаги, аналіз її кількості, швидкість поширення пожежі на об'єкті;
- врахування наявності систем протипожежного захисту;
- тривалість моделювання, зокрема час прибуття і розгортання пожежно-рятувальних підрозділів;
- сумісність комірок розрахункової області із геометрією досліджуваного об'єкту та протипожежного карнизу;
- врахування умов навколишнього середовища;
- вибір критеріїв, які характеризують оцінку отриманого результату;
- обов'язкове порівняння результатів дослідження протипожежних карнизів із даними сценарію пожежі без їх використання.

В більшості випадків, для отримання найгіршого сценарію пожежі під час

проведення комп'ютерного моделювання не доцільно враховувати ідеальну роботу всіх систем протипожежного захисту, якими оснащено об'єкт розрахунку. Оскільки даний підхід не дозволить отримати найгірший розвиток пожежі, при цьому існує висока ймовірність ліквідації пожежі такими системами на початковій стадії її виникнення. Таким чином, під час проведення оцінювання справедливо приймати сценарій, коли пожежа вільно розвивається упродовж всієї тривалості роботи імітаційної моделі.

На адекватність результатів моделювання також впливають задані характеристики та фізичні параметри матеріалів об'єктів, які використовуються в моделі та зокрема входять до складу пожежної навантаги.

Окремим важливим аспектом є вибір місця встановлення датчиків (вимірювачів) температури та інших показників в моделі фасаду будівлі з врахуванням параметрів розрахункової області. Правильне розташування вимірювачів дозволяє відстежити динаміку зміни температури в ключових зонах, а саме:

- поблизу джерела займання, для оцінювання температурного режиму розрахункової пожежі;
- в зоні виходу пожежі крізь світловий проріз;
- в зоні розташування вікна для поверху, який піддається впливу пожежі і в середину приміщення якого може поширитися вогонь.

Аналогічний підхід зберігається для оцінювання поширення пожежі на експлуатовану покрівлю.

Під час проведення моделювання слід проаналізувати отриману теплову динаміку, зокрема для оцінювання критичного часу, коли досягається гранична температура цілісності для досліджуваних структур.

Під час проведення натурних вогневих досліджень важливим є використання верифікованих засобів вимірювальної техніки та правильний вибір місця їх розташування. Серед ключових складових, від яких залежить коректна оцінка ефективності протипожежних карнизів є вибір модельного

вогнища пожежі. Дане питання є досить складним, оскільки окрім необхідного температурного режиму та площі пожежі слід забезпечити її достатню тривалість горіння. Таким чином, найбільш доцільним для даного випадку випробувань є застосуванням модельних або макетних вогнищ пожежі класів В. Окрім сталого температурного режиму та прогнозованої поведінки модельного вогнища В, перевагою горючих рідин є те, що на відміну від модельних вогнищ класу А не можливо зменшити кількість навантаги (оскільки вогнище не забезпечить необхідну тривалість горіння), а також використовувати вологу деревину для зменшення інтенсивності горіння. Також, перевагою модельних вогнищ класу В є мінімальна тривалість розгоряння та швидкий вихід пожежі на робочий режим у 600-700 °С, на що модельним вогнищам класу А потрібно 5-10 хвилин.

5.3 Оцінка економічного ефекту на прикладі об'єкту будівництва

Оцінка економічного ефекту в будівництві під час застосування систем протипожежного захисту (активного чи пасивного типу) є важливим етапом аналізу доцільності інвестування у безпеку об'єкта, та запропонованих протипожежних рішень. Проведення даного аналізу дозволяє визначити, наскільки ефективним є впровадження запропонованих систем протипожежного захисту з погляду зменшення потенційних збитків і витрат на ліквідацію наслідків пожеж.

Застосування активних протипожежних систем (автоматичні установки пожежогасіння, системи димовидалення, пожежна сигналізація) знижують імовірність виникнення масштабних пожеж і, відповідно, впливають на рівень прямих збитків, зокрема знищення майна та споруди в цілому. Разом із цим, такі активні системи протипожежного захисту є досить дорого вартісними та впливають як на прямі так і на побічні економічні витрати під час будівництва об'єктів різного функціонального призначення [124-125].

В основі методів оцінки економічного ефекту лежить принцип

порівняння результатів під час застосування та не застосування запропонованих інженерних протипожежних рішень, тобто порівнюється ситуація без впровадження протипожежної системи і з нею, що можна описати залежністю [126]:

$$E = Z_6 - Z_c \quad , \quad (5.1)$$

де: E – економічний ефект; Z_6 – збитки без запропонованої протипожежної системи; Z_c – збитки із улаштованою протипожежною системою.

Також під час оцінювання, можливе визначення суми капітальних та експлуатаційних витрат на систему, що порівнюється з очікуваними зниженими втратами у часі з урахуванням дисконтування об'єкту.

Застосування ефективного фасадного протипожежного карнизу може істотно вплинути на економічний ефект для будівлі при проведенні оцінки ефективності та доцільності систем протипожежного захисту, особливо в умовах сучасного будівництва з використанням вентилязованих фасадів та легкозаймистих облицювальних матеріалів. Зокрема на оцінку потенційних збитків від поширення зовнішньої пожежі впливає:

- пошкодження фасадної системи на декількох поверхах;
- негативний температурний вплив на несучі конструкції будівлі;
- перешкоджає евакуації людей, зокрема через зовнішні повітряні зони у сходових клітках та відкритих переходах;
- перешкоджає ефективній роботі пожежно-рятувальних підрозділів та створює загрози для їх життя в разі руйнування фасадної системи;
- впливає на вартість відновлення фасадної системи;
- збільшує загальні пожежні ризики на об'єкті.

В свою чергу, наявність ефективного протипожежного карнизу дозволяє:

- фізично перешкоджати вертикальному поширенню пожежі по зовнішнім огорожувальним конструкціям;

- збільшує час для розгортання і гасіння пожежі для пожежно-рятувальних підрозділів;
- знижує вплив небезпечних чинників пожежі, зокрема температури та диму на верхніх поверхах, що дозволяє уникнути трагедій пов'язаних із панікою людей під час надзвичайних ситуацій.

Таким чином проведемо розрахунок економічного ефекту під час застосування протипожежного карнизу у висотній будівлі за методологією [126-127] та для наступних вихідних умовах:

Висотна громадська будівля має 30 поверхів (умовна висота 109 м), висота приміщення в межах одного поверху складає 3 м. Площа забудови по периметру становить 2000 м² (довжина по периметру 180 м). Швидкість вертикального поширення пожежі по негорючим фасадам приймаємо мінімальну 0,025 м/с (згідно із дослідженнями BRE Global (Велика Британія) може становити від 0,025 до 3,7 м/с).

Розрахунок економічного ефекту проводимо для двох типів протипожежних карнизів з нормативною шириною виступу 0,75 м, а саме для прямого протипожежного карнизу, протипожежного карнизу з формою «вінглету» та для громадської будівлі, яка не обладнана карнизом.

Вартість 1 м виготовлення карнизу по периметру становить 4 000 грн. Таким чином, вартість улаштування протипожежного карнизу по периметру будівлі складатиме:

$$180 \text{ м} \times 4 \text{ 000 грн} = 720 \text{ 000 грн.}$$

Вартість будівництва одного квадратного метру становить 30 тисяч гривень. Фасад виконаний із негорючих матеріалів алюмінієвих панелей. Час початку гасіння пожежі приймаємо 20 хвилин із розрахунку, що нормативний час прибуття пожежно-рятувальних підрозділів складає 10 хвилин та додатково приймаємо час на розгортання 10 хвилин. Систематизовані вихідні дані

наведено в таблиці 5.1

Таблиця 5.1 – Вихідні дані для розрахунку економічного ефекту

Значення	Вихідні параметри		
	Без протипожежного карнизу	З прямим протипожежним карнизом 0,75 м	З протипожежним карнизом у формі «вінглету» 0,75 м
Початковий поверх займання	10	10	10
Швидкість поширення вогню	0,025 м/с	0,025 м/с	0,025 м/с
Тривалість поширення	1200 с.	1200 с.	1200 с.
Висота одного поверху	3 м	3 м	3 м
Периметр будівлі	180 м	180 м	180 м
Вартість 1 м карнизу	0	4 000 грн	4 000 грн
Вартість 1 м ² будівництва	30 000 грн	30 000 грн	30 000 грн
Відносна ефективність обмеження поширення полум'я	0	60%	80%

Таким чином, в разі пожежі на 10 поверсі будівлі протипожежний карниз повинен частково обмежити поширення пожежі вище 15 поверху будівлі з врахуванням його ефективності. Зважаючи на швидкість поширення пожежі, висота розповсюдження пожежі складатиме:

$$\text{Висота розповсюдження} = 0,025 \times 1200 = 30 \text{ м, тобто 10 поверхів.}$$

Тобто визначено, що за даних умов при відсутності протипожежного карнизу пожежа з 10 поверху пошириться за 1200 секунд до 20 поверху. При цьому врахуємо, що площа фасаду будівлі в межах одного поверху становить 540 м².

Проведемо аналогічний розрахунок, щодо визначення критичної висоти розповсюдження при застосуванні визначених типів протипожежних карнизів з врахуванням їх ефективності. Аналіз демонструє, що в будь-якому випадку

пожежа поширюватиметься з 10 поверху до поверху влаштування фасадної протипожежної перешкоди. При цьому, при застосування прямого протипожежного карнизу з 60% ефективності пожежа вище карнизу пошириться :

$5 \times 0,6 = 3$ поверхи захищено, 2 поверхи буде пошкоджено від пожежі;

При застосуванні протипожежного карнизу з 80% ефективності пожежа вище карнизу пошириться :

$5 \times 0,8 = 4$ поверхи захищено, 1 поверх буде пошкоджено від пожежі.

Таким чином, знаючи площу фасаду для кожного поверху будівлі, кількість потенційно уражених пожежею поверхів, вартість будівництва оцінимо вартість прямих збитків від пожежі. Результати наведено в таблиці 5.2

Таблиця 5.2 – Вартість прямих збитків від пожежі

Варіант	Уражені пожежею поверхи	Площа фасаду (м ²)	Збитки (грн), млн
Без карнизу	10–20 (10 пов.)	$10 \times 540 = 5\,400$	$5\,400 \times 30\,000 = 162$
Прямий карниз 60%	10–15 (5 пов.) + 2 пов. вище (40% × 5 пов.) = 7 поверхів	$7 \times 540 = 3\,780$	$3\,780 \times 30\,000 = 113,4$
Карниз у формі вінглету 80%	10–15 (5 пов.) + 1 пов. вище (20% × 5 пов.) = 6 поверхів	$6 \times 540 = 3\,240$	$3\,240 \times 30\,000 = 97,2$

Маючи дані, щодо фактичної вартості будівництва протипожежного карнизу 715 200 грн (капітальні витрати), можемо визначити за формулою 5.1 чистий економічний ефект для даного типу будівлі, що наведено в таблиці 5.3.

Таблиця 5.3 – Дані щодо отриманого економічного ефекту

Варіант	Збитки, млн грн	Вартість карнизу, млн грн	Економія без карнизу	Чистий ефект
Без карнизу	162	–	–	–
Прямий карниз, 60%	113,4	0,715	$162 - 113,4 = 48,6$ млн	47,89 млн
Карниз у формі вінглету, 80%	97,2	0,715	$162 - 97,2 = 64,8$ млн	64,08 млн

Таким чином можемо зробити наступні висновки за прийнятих вихідних умов розрахунку. Для висотної громадської будівлі з кількістю поверхів 30, яка не обладнана на межі протипожежних відсіків (на рівні 15 поверху) протипожежним карнизом потенційна кількість уражених пожежею поверхів фасаду становить не менше 10, при цьому уражена площа фасаду становитиме 5400 м^2 , а прямі збитки становитимуть 162 мільйони гривень без капітальних вкладень на будівництво карнизу. При застосуванні прямого протипожежного карнизу або протипожежного карнизу у формі вінглету, капітальні витрати збільшуються на 0,715 млн грн., проте кількість ураженого фасаду по поверхам не перевищує 7 та 6 відповідно. При цьому уражена площа фасаду будівлі при застосуванні прямого протипожежного карнизу складає $3\,780 \text{ м}^2$, а для протипожежного карнизу у формі «вінглету» $3\,240 \text{ м}^2$. Таким чином, чистий економічний ефект при застосуванні прямого протипожежного карнизу та протипожежного карнизу у формі «вінглету» складає 47,89 млн грн. та 64,08 млн грн. відповідно, що демонструє високу економічну ефективність таких фасадних протипожежних перешкод при їх раціональному застосуванні.

5.4. Висновки до розділу

1. Удосконалено методичні підходи для проведення розрахункової оцінки обмеження поширення зовнішньої пожежі в будівлі шляхом використання розробленого алгоритму підбору певного типу протипожежного карнизу, що забезпечує не перевищення критичної температури $t_{\text{кр}} 260 \text{ }^\circ\text{C}$ для захисту різних функціональних зон фасаду будівлі.

2. На основі попереднього критичного аналізу чинників, які впливають на здійснення оцінки ефективності фасадних протипожежних карнизів за допомогою комп'ютерного моделювання, визначено найбільш значущі параметри, які лежать в основі достовірного отримання даних, щодо забезпечення обмеження поширення вертикального поширення пожежі ззовні фасаду.

3. На прикладі об'єкту висотної громадської будівлі проведено оцінювання економічного ефекту від застосування протипожежних карнизів з нормативною шириною виступу 0,75 м, а саме для прямого протипожежного карнизу, протипожежного карнизу з формою «вінглету» та для громадської будівлі, яка не обладнана карнизом. Застосування розробленого алгоритму підбору фасадних протипожежних перешкод продемонструвало, що загальну суму прямих збитків від руйнування конструкції фасаду від зовнішньої пожежі можливо зменшити до 29% у порівнянні з існуючими методами застосування фасадних протипожежних перешкод.

4. Розроблено методологію підбору типу протипожежного карнизу для ефективного захисту функціональних зон будівлі із застосуванням параметричного методу нормування дозволяє ефективно адаптувати зміни у технологіях будівництва, матеріалах та оптимізувати матеріальні витрати, при цьому не знижуючи рівень пожежних ризиків для об'єкту. Таким чином, була поглиблена та розширена методика прогнозування поширення пожежі зовнішніми огорожувальними конструкціями будівель та її обмеження фасадними протипожежними перешкодами різних типів конструктивного виконання.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі, яка є завершеним науковим дослідженням приведено результати розв'язання актуального наукового завдання з розкриття закономірності впливу конструктивних параметрів фасадних протипожежних карнизів на ефективність запобігання поширення пожежі ззовні будівлі на вище розташовані поверхи та її різні функціональні зони, як наукове підґрунтя для удосконалення вимог пожежної безпеки фасадних систем та будівель в цілому.

На основі отриманих залежностей та виявлених закономірностей отримано такі основні результати:

1. Критичний аналіз сучасного стану розроблення та застосування методик оцінювання ефективності забезпечення обмеження поширення зовнішньої пожежі не включає можливість оцінювання відносної ефективності фасадної протипожежної перешкоди в залежності від її конструктивних параметрів та форми виступу протипожежного карнизу за площину фасаду. При цьому доведено необхідність врахування форм їх виступу, які можуть значно впливати на захист різних функціональних зон будівлі, з врахуванням конструктивного та архітектурного виконання їх фасадних систем.

2. На підставі аналізу існуючих теоретичних моделей, які описують траєкторію зовнішнього поширення полум'я уздовж фасаду та критичні умови повторного його приєднання до нього, визначено критерії ефективності, які полягають у досягненні точки балансу, де початкова швидкість від імпульсу теплового потоку наближається до нуля, а точка приєднання полум'я до фасаду є результатом досягнення значення нуля для тиску, а також розроблено математичну модель руху полум'я та розігрітих газів, утворених під час пожежі при взаємодії з протипожежним карнизом. Вперше розроблено математичну модель руху з багатогранними виступами, відмінністю якої є врахування впливу геометрії карнизу на параметри конвективного потоку, що забезпечує зниження його тиску та швидкості до 60 % і унеможливує повторне приєднання полум'я до фасаду будівлі.

Сформульовано гіпотезу, що в разі застосування у якості фасадних протипожежних перешкод прямокутних виступів або багатогранних виступів загального прямокутного профілю, можливо створити зону найменшої швидкості від початкового імпульсу та максимального тиску поза зоною фасадної площини та уникнути утворення точки повторного приєднання полум'я в зоні фасаду, що впливатиме на зменшення ризику стрімкого поширення фасадної пожежі.

3. Розроблено експериментальну установку для дослідження поширення пожежі по фасаду будівлі, яка відтворює фрагмент фасадної системи з імітацією реального осередку пожежі та дозволяє встановлювати протипожежні карнизи різних типів для оцінювання обмеження поширення пожежі. На основі верифікованої програми експериментальних досліджень процесів поширення зовнішньої пожежі розроблено методику для проведення комп'ютерного моделювання щодо дослідження закономірностей впливу конструктивних параметрів протипожежних карнизів на ефективність запобігання вертикальному поширенню пожежі. Систематизовано та узагальнено дані експериментальних досліджень, які характеризують небезпеку, яка безпосередньо впливає на поширення зовнішньої пожежі на вище розташовані поверхи, які захищено протипожежними карнизами найбільш поширених конструктивних типів.

4. За результатом проведеної серії експериментальних досліджень із застосуванням створеної газо-гідродинамічної моделі та розробленої експериментальної установки виявлено, що застосування фасадних протипожежних перешкод заокругленої форми шириною від 0,3 м до 0,75 м створює зону підвищеного тиску і швидкості висхідного потоку від дії пожежі з навантагою до 780 МДж/м^2 , що забезпечує зниження температури на зовнішній поверхні стіни у 2,2-2,5 разів на висоті до 1,7 м, проте створює передумови утворення явища повторного приєднання полум'я до фасаду. Даний тип фасадної протипожежної перешкоди є ефективною для захисту від

поширення пожежі на покрівлю будівлі, оскільки дозволяє створити зону в межах до 1,4 м висоти, де значення температури від дії пожежі не перевищує 200 °С. Разом із цим траєкторія руху полум'я і розігрітих газів від пожежі під час проходження прямого протипожежного карнизу шириною від 0,3 м до 0,75 м з багатограними виступами шириною 0,1-0,25 м кожен забезпечує зниження тиску і швидкості висхідного потоку до 60 %, що свідчить про досягнення траєкторії полум'я, при якій утворення точки повторного приєднання полум'я в зоні фасаду є малоймовірним.

5. Систематизовано та узагальнено дані здійснення розрахункової оцінки ефективності обмеження поширення зовнішньої пожежі по фасаду будівлі при застосування протипожежних карнизів різного конструктивного типу для різних функціональних зон фасаду будівлі, що дозволило поглибити та розширити методику прогнозування поширення фасадних пожеж. Оцінка економічного ефекту від застосування протипожежних карнизів з нормативною шириною виступу від 0,3 м до 1,5 м показала, що загальну суму прямих збитків від руйнування конструкції фасаду під час зовнішньої пожежі можливо зменшити до 29 % у порівнянні з існуючим розпорядчим методам застосування фасадних протипожежних перешкод.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Про надання будівельної продукції на ринку : Закон України від 02.09.2020 № 850-IX. *Відомості Верховної Ради України*. 2021. № 14. С. 2.
2. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Основні вимоги до будівель і споруд. Пожежна безпека : ДБН В.1.2-7-2008. [Чинні від 2008-10-01]. Київ : Мінрегіонбуд України, 2008. 31 с. (Державні будівельні норми України).
3. Захист від пожежі. Пожежна безпека об'єктів будівництва : ДБН В.1.1.7-2016. [Чинні від 2017-06-01]. Київ : Мінрегіон України, 2017. 41 с. (Державні будівельні норми України).
4. Bonner M., Rein G. Flammability and multi-objective performance of building façades: Towards optimum design. *International journal of high-rise buildings*. 2018. Vol. 7, No. 4. P. 363–374.
5. Захист від пожежі. Будівельні конструкції. Методи випробування на вогнестійкість. Загальні вимоги : ДСТУ Б В.1.1-4-98. [На заміну СТ СЭВ 1000-88 ; чинний від 2006-01-01]. Київ : ДП УкрНДНЦ, 2006. 44 с.
6. Будинки і споруди. Громадські будинки та споруди. Основні положення : ДБН В.2.2-9:2018. [Чинні від 2019-06-01]. Київ : Мінрегіон України, 2018. 49 с. (Державні будівельні норми України).
7. Будинки і споруди. Житлові будинки. Основні положення : ДБН В.2.2-15:2019. [Чинні від 2019-12-01]. Київ : Мінрегіон України, 2018. 76 с. (Державні будівельні норми України).
8. Висотні будівлі. Основні положення : ДБН В.2.2-41:2019. [Чинні від 2020-01-01]. Київ : Мінрегіон України, 2019. 53 с. (Державні будівельні норми України).
9. Фещук Ю. Л., Ніжник В. В., Балло Я. В. Аналіз закордонних нормативних документів щодо вимог пожежної безпеки під час проектування висотних громадських будинків. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація*. 2020. Т. 4, № 2. С. 77–88.

10. SP Fire 105. External wall assemblies and facade claddings. Reaction to fire. SP Technical Research Institute of Sweden, 1994. 16 p.
11. DIN 4102-20-2017. Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen. Teil 20: Ergänzender Nachweis für die Beurteilung des Brandverhaltens von Außenwandbekleidungen. GIS, 2017. 25 S.
12. An W., Sun J., Liew K. M., Zhu G. Effects of building concave structure on flame spread over extruded polystyrene thermal insulation material. *Applied Thermal Engineering*. 2017. Vol. 121. P. 802–809.
13. McNamara D. J., Mell W. E. Examining exposure fires from the United States national fire incident reporting system between 2002 and 2020. *Fire*. 2024. Vol. 7, No. 3. P. 74.
14. National Fire Incident Reporting System (NFIRS) / U.S. Fire Administration. Federal Emergency Management Agency, 2025. URL: <https://www.usfa.fema.gov/data/nfirs/>.
15. McKenna S. T., Jones N., Peck G., Dickens K., Pawelec W., Oradei S., Hull T. R. Fire behaviour of modern façade materials – Understanding the Grenfell Tower fire. *Journal of hazardous materials*. 2019. Vol. 368. P. 115–123.
16. Watt R. G. Grenfell Tower fire – A tragic case study in health inequalities. *British dental journal*. 2017. Vol. 223, No. 7. P. 478–480.
17. Guillaume E., Dréan V., Girardin B., Benameur F., Koohkan M., Fateh T. Reconstruction of Grenfell Tower fire. Part 3 – Numerical simulation of the Grenfell Tower disaster. *Fire and Materials*. 2020. Vol. 44, No. 1. P. 35–57.
18. Kim Y. S., Mizuno M., Ohmiya Y. Fire examination of Superhigh-rise apartment building “Wooshin Golden suites” in Busan, Korea. *Fire Science and Technology*. 2011. Vol. 30, No. 3. P. 81–90.
19. Guillaume E., Fateh T., Schillinger R., Chiva R., Ukleja S. Study of fire behaviour of facade mock-ups equipped with aluminium composite material-based claddings. *Fire and Materials*. 2018. Vol. 42, No. 5. P. 561–577.
20. Uddin M. M., Hossain S. N., Shawon T. A., Fahim A. U., Sharmin S.,

Rahman M. M. Addressing the fire safety problems in shopping centres of dhaka city: A case study on some selected shopping centres in Mirpur area. *Environmental History Review*. 2023. Vol. 19, No. 2. P. 1–36.

21. Пожежа у київській багатоповерхівці ЖК Jack House: На місці працюють всі екстрені служби / Big Kyiv, 2024. URL: <https://bigkyiv.com.ua/pozhezha-u-kyivskij-bagatopoverhivczi-zhk-jack-house-na-misczi-praczyuyut-vsi-ekstreni-sluzhby/>.

22. Ковалишин Б., Балло Я., Ніжник В., Стилик І., Кагітін О. Перспективні напрями підвищення ефективності обмеження поширення пожежі по зовнішніх огорожувальних конструкціях. *Пожезна безпека*. 2024. Т. 44. С. 20–29.

23. Ковалишин Б., Балло Я. До питань підвищення ефективності запобігання поширення пожежі протипожежними карнизми. *Проблеми та перспективи розвитку системи безпеки життєдіяльності: XIX Міжнародна науково-практична конференція молодих вчених, курсантів та студентів (28-29 берез. 2024)*. Львів: ЛДУ БЖД, 2024. С. 147–150.

24. Ballo Y., Yakovchuk R., Kovalchuk V., Nizhnyk V., Veselivskyi R. Investigation of the fire-preventing eaves effectiveness to prevent the fire spreading by vertical building structures of high-rise buildings. *AIP Conference Proceedings*. 2023. Vol. 2684, No. 1. URL: <https://doi.org/10.1063/5.0119998>.

25. Wermeil S. The development of fireproof construction in Great Britain and the United States in the nineteenth century. *Structural Iron and Steel, 1850–1900*. Routledge, 2017. P. 69–92.

26. Brown C.U., Maranghides A., Nazare S., Di Cristina G., Bailey D.M., Fox L., Link E., Ramesh S., Monroy X., Miller J.H., McCaughey E.E., Flores M.M. NIST Eave and Vent Experiments (EaVE) EaVEs Phase A: Test Plan / National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD. NIST Technical Note (TN) NIST TN 2288. 2024. URL: <https://doi.org/10.6028/NIST.TN.2288>.

27. Fang X., Tang F., Ren F. Flame Extension Length Beneath an Inclined Eave

Induced By Facade Fire Plume. *Fire Technology*. 2025. Vol. 61, No. 4. P. 2217–2234.

28. Brandskyddsregler / Brandskyddskanalen, 2024. URL: <https://brandskyddskanalen.se/brandskyddsregler/>.

29. Nilsson M. The impact of horizontal projections on external fire spread – A numerical comparative study. *LUTVDG/TVBB*. 2016. P. 147.

30. SP Fire 105. External wall assemblies and facade claddings. Reaction to fire. SP Technical Research Institute of Sweden, 1994. 16 p.

31. Karlsson B., Norén J., Utstrand J., Baker G. Fire Safety Engineering for Innovative and Sustainable Building Solutions. *Book of Abstracts*. 2016. P. 60.

32. Borges C., Meijer F. M., Visscher H. J. Technical building regulations in EU countries: a comparison of their organization and formulation. *CIB World Congress 2010*. P. 78.

33. Halvorsen K., Almklov P. G., Gjørund G. Fire safety for vulnerable groups: The challenges of cross-sector collaboration in Norwegian municipalities. *Fire Safety Journal*. 2017. Vol. 92. P. 1–8.

34. Wang H., Fan W. Progress and problems of fire protection in China. *Fire Safety Journal*. 1997. Vol. 28, No. 3. P. 191–205.

35. Standard for geotechnical testing method : GB/T 50123-2019. [Effective from 2019-10-01]. Issued by Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Beijing : China Architecture & Building Press, 2019. 681 p.

36. Biao Z., Xiao-Meng Z., Ming-Yong C. Fire protection of historic buildings: A case study of Group-living Yard in Tianjin. *Journal of Cultural Heritage*. 2012. Vol. 13, No. 4. P. 389–396.

37. Portaria No. 1532/2008 / Diário da República, 2008. URL: <https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/portaria/1532-2008-444380>.

38. Parente J., Pereira M. G. Structural fire risk: The case of Portugal. *Science of the Total Environment*. 2016. Vol. 573. P. 883–893.

39. The Building Code of Australia / Government of South Australia. URL:

<https://www.sa.gov.au/topics/business-and-trade/building-industry/building-rules-regulations-and-information/the-building-code-of-australia>.

40. Hirschler M. M. Procedures for development and revision of codes and standards associated with fire safety in the USA. *Fire and Materials*. 2017. Vol. 41, No. 8. P. 1058–1071.

41. NFPA 1 Uniform Fire Code / National Fire Protection Association, 2006. 560 p.

42. Code de la construction et de l'habitation / Légifrance. URL: https://www.legifrance.gouv.fr/codes/texte_lc/LEGITEXT000006074096/.

43. Nwadike A., Wilkinson S. Challenges facing building code compliance in New Zealand. *International Journal of Construction Management*. 2022. Vol. 22, No. 13. P. 2493–2503.

44. C/AS1: Protection from fire (2nd ed.) / New Zealand Ministry of Business, Innovation & Employment, 2019. URL: <https://www.building.govt.nz/assets/Uploads/building-code-compliance/c-protection-from-fire/asvm/cas1-protection-from-fire-second-edition.pdf>.

45. Anderson J., Boström L., Jansson Mcnamee R. Fire safety of facades. *RISE Rapport*. 2017. P. 55.

46. Engel T., Werther N. Structural means for fire-safe wooden facade design. *Fire Technology*. 2023. P. 1–35.

47. Sassi S., Setti P., Amaro G., Mazziotti L., Paduano G., Cancelliere P., Madeddu M. Fire safety engineering applied to high-rise building facades. *MATEC Web of Conferences*. 2016. Vol. 46. P. 04002.

48. Rukavina M. J., Carevic M., Pecur I. B. Fire protection of facades. *The Guidelines for Designers, Architects, Engineers and Fire Experts*. 2017. P. 12–15.

49. Ko Y., Aram M., Zhang X., Qi D. Fire safety of building integrated photovoltaic systems: Critical review for codes and standards. *Indoor and Built Environment*. 2023. Vol. 32, No. 1. P. 25–43.

50. Яковчук Р. С., Кузык А. Д., Міллер О. В., Лин А. С. Теплоізоляційно-

оздоблювальні системи фасадів будинків як фактор підвищеної пожежної небезпеки. *Пожежна безпека*. Львів : ЛДУ БЖД, УкрНДІЦЗ, 2018. № 32. С. 80–89.

51. Lamberto M., Cancelliere P. The Italian National Guidelines for the fire safety of facades. *MATEC Web of Conferences*. 2013. Vol. 9. P. 01005.

52. Нуянзін В. М. Проблеми визначення довговічності вогнезахисних покриттів металевих конструкцій в Україні. *Пожежна безпека: теорія і практика*. 2014. № 16. С. 77–82.

53. Григоренко О. М., Саєнко Н. В., Липовий В. О., Афанасенко К. А. Оптимізація методу оцінки вогнезахисної ефективності покривів реактивного типу / ред. кол. І. Толок. Харків : НУЦЗУ. 298 с.

54. Березовський А. І. Дослідження вогнезахисної здатності вогнезахисних покриттів металевих конструкцій : дис. ... д-ра техн. наук. Черкаси : ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля, 2023. 436 с.

55. Rukavina M. J., Carevic M., Pecur I. B. Fire protection of facades. *The Guidelines for Designers, Architects, Engineers and Fire Experts*. 2017. P. 12–15.

56. Nguyen K. T., Weerasinghe P., Mendis P., Ngo T. Performance of modern building façades in fire: a comprehensive review. *Electronic Journal of Structural Engineering*. 2016. Vol. 16. P. 69–87.

57. Хом'як Я. І., Пресняк І. С., Харченко І. О. [та ін.]. Особливості пожежної небезпеки теплоізоляційно-оздоблювальних систем фасадів будинків. 2018. 524 с.

58. Gatterdam V., Mader T., Trommer K. Höchste Flammbeständigkeit leichter Verbundwerkstoffe auf Basis von Basaltfasern. *Technical Textiles/Technische Textilien*. 2022. No. 65(3). S. 114–116.

59. Deutsches Institut für Normung. DIN 13501: Fire classification of construction products and building elements – Part 1: Classification using data from reaction to fire tests; Part 2: Classification using data from fire resistance tests, excluding ventilation services. Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden. P. 23–

380.

60. Балло Я. В., Сізіков О. О., Голікова С. Ю., Гордєєв П. М. Вплив конструктивних параметрів фасадних протипожежних карнизів на запобігання поширення пожежі в висотних будинках. *Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій* : матеріали XI Міжнар. наук.-практ. конф. Черкаси : ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля, 2020. С. 139–141.

61. Балло Я. В., Яковчук Р. С., Ніжник В. В. [та ін.]. Дослідження конструктивних параметрів протипожежних карнизів для запобігання поширенню пожежі фасадними конструкціями висотних будинків. *Пожезна безпека*. 2020. № 37. С. 16–23.

62. Marija J. R., Carević M., Pećur I. B. Fire protection of façades. University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering. 2017. P. 26–35.

63. Fire spread modes and performance of fire stops in vented facade constructions : overview and standardization of test methods. *MATEC Web of Conferences*. Vol. 9. P. 02002.

64. Beyhan F., Civelek E. An Investigation on Performance Based Design Determining the Effect of Facade Geometry on the Fire Ways. *International Sustainable Buildings Symposium*. Cham : Springer, 2017. P. 655–673.

65. Safety glazing materials in building. Part 1: Fire-resistant glass : GB 15763.1-2009. [Effective from 2001-07-13]. Republic of China : Former State Building Materials Industry Bureau, 2001. 13 p.

66. Himoto K., Tsuchihashi T., Tanaka Y., Tanaka T. Modeling the trajectory of window flames with regard to flow attachment to the adjacent wall. *Fire Safety Journal*. 2009. Vol. 44, No. 2. P. 250–258.

67. Ohmiya Y., Hori Y. Properties of external flame taking into consideration excess fuel gas ejected from fire compartment. *Journal of Architecture, Planning & Environmental Engineering*. 2001. No. 545. P. 1–8.

68. Himoto K., Tsuchihashi T., Tanaka Y., Tanaka T. Modeling thermal behaviors of window flame ejected from a fire compartment. *Fire Safety Journal*.

2009. Vol. 44, No. 2. P. 230–240.

69. Sun X., Hu L., Ren F., Hu K. Flame height and temperature profile of window ejected thermal plume from compartment fire without facade wall. *International Journal of Thermal Sciences*. 2018. Vol. 127. P. 53–60.

70. Liu Y., Moser A., Sinai Y. Comparison of a CFD fire model against a ventilated fire experiment in an enclosure. *International Journal of Ventilation*. 2004. Vol. 3, No. 2. P. 169–181.

71. McGrattan K. B., Forney G. P. Fire dynamics simulator: user's manual / US Department of Commerce, Technology Administration, National Institute of Standards and Technology. Gaithersburg : NIST, 2000. 51 p.

72. Batchelor G. K. An introduction to fluid dynamics. Cambridge University Press, 2000. 615 p.

73. Rehm R. G., Baum H. R. The Equations of Motion for Thermally Driven, Buoyant Flows. *Journal of Research of the NBS*. 1978. Vol. 83. P. 297–308.

74. Smagorinsky J. General Circulation Experiments with the Primitive Equations. *Monthly Weather Review*. 1963. Vol. 91. P. 99–164.

75. Deardorff J. W. Numerical Investigation of Neutral and Unstable Planetary Boundary Layers. *Journal of Atmospheric Sciences*. 1972. Vol. 29. P. 91–115.

76. Germano M., Piomelli U., Moin P., Cabot W. H. A Dynamic Subgrid-Scale Eddy Viscosity Model. *Physics of Fluids A*. Vol. 3. P. 1760–1765.

77. Lilly D. K. A Proposed Modification of the Germano Subgrid-Scale Closure Method. *Physics of Fluids A*. 1992. Vol. 4. P. 633–635.

78. Reid R. C., Prausnitz J. M., Poling B. E. Properties of Gases and Liquids. 4th ed. New York : McGraw-Hill, 1987. 753 p.

79. Puri I. K., Seshadri K. Extinction of Diffusion Flames Burning Diluted Methane and Diluted Propane in Diluted Air. *Combustion and Flame*. 1986. Vol. 65. P. 137–150.

80. Westbrook C. K., Dryer F. L. Simplified Reaction Mechanisms for the Oxidation of Hydrocarbon Fuels in Flames. *Combustion Science and Technology*.

1980. Vol. 27. P. 31–43.

81. Пашинський М. В. Запаси територіального районування кліматичних навантажень в ДБН В. 1.2-2: 2006. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*. 2017. № 8. С. 201–208.

82. Aguirre-López M. A., Hueyotl-Zahuantitla F., Martínez-Vázquez P. Passive Control Measures of Wind Flow around Tall Buildings. *Buildings*. 2024. Vol. 14, No. 6. P. 1514.

83. Gonçalves J. C. S., Umakoshi É. M. The environmental performance of tall buildings. Routledge, 2010. 400 p.

84. Defraeye T., Blocken B., Carmeliet J. CFD analysis of convective heat transfer at the surfaces of a cube immersed in a turbulent boundary layer. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2010. Vol. 53, Iss. 1–3. P. 297–308.

85. Hang J., Li Y., Sandberg M., Claesson L. Wind conditions and ventilation in high-rise long street models. *Building and Environment*. 2010. Vol. 45, No. 6. P. 1353–1365.

86. **Ковалишин Б.**, Балло Я. Дослідження впливу конструктивних параметрів протипожежних карнизів на процеси поширення пожежі. *Надзвичайні ситуації: безпека та захист: XIV Всеукраїнська науково-практична конференція з міжнародною участю (24-25 жовт. 2024)*. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2024. С. 102–103.

87. Wan P., Han X., Mao J. Very Large Eddy Simulation of turbulent flow and heat transfer for single cylinder and cylindrical pin matrix. *Appl. Therm. Eng.* 2020. Vol. 169. P. 114972.

88. Dréan V., Schillinger R., Auguin G. Fire exposed facades: Numerical modelling of the LEPiR2 testing facility. *MATEC Web of Conferences*. 2016. Vol. 46. P. 03001.

89. Fang X., Zhang X., Yi J., Sun X., Tang F., Ren F., Hu L. Experimental study on vertical temperature of facade fire plume ejected from compartment

constrained by adjacent single sidewall. *International Journal of Thermal Sciences*. 2023. Vol. 193. P. 108470.

90. Єврокод 1. Дії на конструкції. Частина 1-2. Загальні дії. Дії на конструкції під час пожежі : ДСТУ-Н Б EN 1991-1-2:2010 (EN 1991-1-2:2002, IDT). [Чинний від 2014-07-01]. Київ : ДП УкрНДНЦ, 2014. 18 с.

91. Нуянзін О. М., Некора О. В., Поздєєв С. В. [та ін.]. Методи математичного моделювання теплових процесів при випробуваннях на вогнестійкість залізобетонних будівельних конструкцій. Черкаси : ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля, 2015. 120 с.

92. Балло Я. В. Створення експериментального випробувального стенду в рамках досліджень обмеження поширення пожежі по фасадам будівель. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2022. № 2 (13). С. 21–34.

93. Ніжник В. В., Поздєєв С. В., Фещук Ю. Л. Методики натурних вогневих досліджень процесів теплопередачі між джерелом теплового випромінювання та промисловими спорудами. *Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті*. Харків, 2018. С. 131–133.

94. Балло Я. В., Сізіков О. О., Циганков А. О., Яковчук Р. С., Некора В. С. Установка для прогнозування поширення пожежі по фасадам будівель. Патент України на корисну модель № 153464, опубл. 12.07.2023, Бюл. № 28.

95. Ballo Y., Nizhnyk V., Veselivskyu R., Kagitin O. Influence of the facade slope on fire propagation processes on higher floors. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023. Vol. 5, No. 10 (125). P. 43–52.

96. Гуліда Е. М. Вплив різних видів пожежного навантаження на димовиділення та на пониження концентрації кисню при пожежі в закритому приміщенні. *Пожежна безпека*. 2014. № 24. С. 129–136.

97. Шналь Т. М., Коваль М. С., Демчина Б. Г., Коваль П.М., Кархут І.І. Повномасштабні пожежні випробування фрагменту великопанельної будівлі.

Вісник Нац. ун-ту «Львівська політехніка» «Теорія і практика будівництва». 2008. № 627. С. 208–212.

98. McLaggan M. S., Gupta V., Hidalgo J. P., Torero J. L. Upward flame spread for fire risk classification of high-rise buildings. *International Journal of High-Rise Buildings*. 2021. Vol. 10, No. 4. P. 299–310.

99. Safety glazing materials in building. Part 1: Fire-resistant glass : GB 15763.1-2009. [Effective from 2001-07-13]. Republic of China, 2001. 13 p.

100. Гуліда Е. М., Меньшикова О. В., Ренкас А. А. Моделювання пожежі в закритому приміщенні. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2012. Вип. 22 (6). С. 307–317.

101. Ніжник В. В., Борисова А. С. Виявлення залежності вітрового впливу на критичну поверхневу густину теплового потоку. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація*. 2020. № 4 (1). С. 48–54.

102. Rossa C. G., Fernandes P. M. An empirical model for the effect of wind on fire spread rate. *Fire*. 2018. Vol. 1, No. 2. P. 31.

103. Висотні будівлі. Основні положення : ДБН В.2.2-41:2019. [Чинні від 2020-01-01]. Київ : Мінрегіон України, 2019. 53 с. (Державні будівельні норми України).

104. Вікна та двері. Стандарт продукту, характеристики продуктивності. Частина 2. Міжкімнатні двері : ДСТУ EN 14351-2:2022 (EN 14351-2:2018, IDT). 88 с.

105. Балло Я., **Ковалишин Б.** Дослідження процесів обмеження поширення пожежі ззовні будівлі за допомогою обчислювальної газо-гідродинаміки. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2025. № 1 (19). С. 31–43.

106. Kagitin O., Veselivskyi R., Havrys A., Ballo Y., Yakovchuk R., **Kovalyshyn B.** Determining the influence of façade parameters and the width of a fire-proof eaves on preventing the spread of fire through external vertical structures of buildings. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. Vol. 4,

№ 1 (130). Р. 6–16.

107. Балло Я., Ковалишин Б. Удосконалення установки для прогнозування поширення пожежі по фасадам будівель. *Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій: XV Міжнародна науково-практична конференція* (24 квіт. 2024). Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2024. С. 126–127.

108. Ковалишин Б., Балло Я. Програма-методика експериментальних вогневих досліджень з оцінювання обмеження поширення пожежі протипожежним карнизом. *Проблеми надзвичайних ситуацій: Міжнародна науково-практична конференція* (14 трав. 2025). Черкаси: НУЦЗ України, 2025. С. 52–53.

109. Melcher T., Zinke R., Trott M., Krause U. Experimental investigations on the repeatability of real scale fire tests. *Fire Safety Journal*. 2016. Vol. 82. P. 101–114.

110. Lautenberger C., Rein G., Fernandez-Pello C. The application of a genetic algorithm to estimate material properties for fire modeling from bench-scale fire test data. *Fire safety journal*. 2006. Vol. 41, No. 3. P. 204–214.

111. Балло Я., Ковалишин Б. Формування програми досліджень поширення пожежі ззовні будівлі та дослідження умов запобігання її поширення. *Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій: Матеріали XVI Міжнародної науково-практичної конференції* (2 трав. 2025). Черкаси: НУЦЗ України, 2025. С. 242–243.

112. Балло Я. В. Розвиток наукових основ запобігання поширення пожежі зовнішніми огорожувальними конструкціями будівель : дис. ... д-ра техн. наук. Львів : ЛДУБЖД, 2024. 437 с.

113. Про будівельні норми : Закон України від 05.11.2009 № 1704-VI. *Відомості Верховної Ради України*. 2010. № 5. С. 41.

114. Фаренюк Г. Методологія та експериментальний комплекс з досліджень в галузі будівельної фізики. *Наука та будівництво*. 2023. № 37 (3). С. 3–12

115. Korhonen T., Hostikka S. Fire Dynamics Simulator with Evacuation FDS+ Evac (Version 5) Technical Reference and User's Guide / National Institute of Standards and Technology. *NIST Special Publication*. 2008. 68 p.

116. Yakovchuk R., Kuzyk A., Skorobagatko T., Yemelyanenko S., Borys O., Dobrostan O. Computer simulation of fire test parameters façade heat insulating system for fire spread in fire dynamics simulator (FDS). *News of National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan*. 2020. No. 4. P. 35–44.

117. Дубінін Д. П., Лісняк А. А., Шевченко С. М., Криворучко Є. М., Гапоненко Ю. І. Дослідження впливу будівельного матеріалу конструкції будівлі на розвиток внутрішньої пожежі. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. 2022. № 1 (35). С. 175–185.

118. Коваль О. М. Швидкість розповсюдження фронту пожежі на відкритих складах пиломатеріалів. *Пожежна безпека: теорія і практика*. 2013. № 13. С. 123–131.

119. Басманов О. Є., Максименко М. В. Моделювання впливу пожежі на резервуар з нафтопродуктом в умовах вітру. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. 2022. № 1 (35). С. 239–253.

120. Коробкін В., Коваленко В., **Ковалишин Б.** Аналіз вимог та методів випробувань покрівель та покрівельних матеріалів на пожежну небезпеку. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2019. № 1 (7). С. 47–53.

121. Балло Я., **Ковалишин Б.** Експериментальні дослідження з визначення ефективності протипожежних карнизів різної форми. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2024. № 2 (18). С. 35–44.

122. Nizhnyk V., Skorobahatko T., Mykhailov V., Ballo Y., Sereda D., **Kovalyshyn B.**, Palchykov R., Demkiv A., Otrosh V., Shcholokov E. Current state of research and normative framework regarding assessment of fire alarm systems suitability for operation. *Ad Alta: Journal of interdisciplinary research*. 2024. Vol. 14, Iss. 1, spec. issue XLI. P. 245–249.

123. Климась Р., Михайлова А., **Ковалишин Б.** Аналіз вітчизняного та зарубіжного досвіду проведення оцінки стану захищеності об'єктів критичної інфраструктури. *Екологічна безпека в умовах війни: збірник тез доповідей V Міжнародної науково практичної конференції* (21 лист. 2024). Львів: ЛДУБЖД, 2024. С. 188–190.

124. Бурлаков О. С., Кінаш І. А. Методика оцінки економічного ефекту від впровадження та використання інструментарію комп'ютеризації обліку. *Інноваційна економіка*. 2015. № 2. С. 251–255.

125. Кононенко Я. В. Моделі оцінки економічного ефекту та ефективності експортно-імпортних операцій (на прикладі парфумерно-косметичних підприємств хімічної промисловості). *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. 2015. № 819. С. 52–57.

126. Ilhan B., Yobas B. Measuring construction for social, economic and environmental assessment. *Engineering, Construction and Architectural Management*. 2019. Vol. 26, No. 5. P. 746–765.

127. Wang R., Asghari V., Cheung C. M., Hsu S. C., Lee C. J. Assessing effects of economic factors on construction cost estimation using deep neural networks. *Automation in Construction*. 2022. Vol. 134. P. 104080.

ДОДАТОК А

Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації

Статті у наукових фахових виданнях України:

1. Коробкін В., Коваленко В., **Ковалишин Б.** Аналіз вимог та методів випробувань покрівель та покрівельних матеріалів на пожежну небезпеку. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2019. № 1 (7). С. 47–53.

Особистий внесок – проаналізовано існуючі методи лабораторних вогневих випробувань та сформульовано задачі досліджень.

2. Балло Я., **Ковалишин Б.** Експериментальні дослідження з визначення ефективності протипожежних карнизів різної форми. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2024. № 2 (18). С. 35–44.

Особистий внесок – розроблено методику експериментальних досліджень, опрацьовано результати та сформульовано висновки.

3. **Ковалишин Б.**, Балло Я., Ніжник В., Стилик І., Кагітін О. Перспективні напрями підвищення ефективності обмеження поширення пожежі по зовнішніх огорожувальних конструкціях. *Пожежна безпека*. 2024. Т. 44. С. 20–29.

Особистий внесок – визначено недоліки існуючих фасадних протипожежних перешкод та сформульовано гіпотезу щодо потенційної можливості удосконалення обмеження зовнішньої пожежі.

4. Балло Я., **Ковалишин Б.** Дослідження процесів обмеження поширення пожежі ззовні будівлі за допомогою обчислювальної газо-гідродинаміки. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2025. № 1 (19). С. 31–43.

Особистий внесок – створено та обґрунтовано параметри комп'ютерної моделі, а також визначено критерії оцінювання ефективності обмеження поширення пожежі протипожежними карнизами.

Публікації у виданнях, що входять до міжнародної наукометричної бази Scopus та Web of Science

5. Kagitin O., Veselivskyi R., Havrys A., Ballo Y., Yakovchuk R., **Kovalyshyn B.** Determining the influence of façade parameters and the width of a fire-proof eaves on preventing the spread of fire through external vertical structures of buildings. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. Vol. 4, № 1 (130). P. 6–16.

Особистий внесок – сформульовано задачі досліджень та здійснено порівняльний аналіз отриманих результатів, які стали основою для формулювання висновків.

6. Nizhnyk V., Skorobahatko T., Mykhailov V., Ballo Y., Sereda D., **Kovalyshyn B.**, Palchykov R., Demkiv A., Otrosh V., Shcholokov E. Current state of research and normative framework regarding assessment of fire alarm systems suitability for operation. *Ad Alta: Journal of interdisciplinary research*. 2024. Vol. 14, Iss. 1, spec. issue XLI. P. 245–249.

Особистий внесок – здійснено обґрунтування впливу наявності систем протипожежного захисту на динаміку та тривалість розвитку пожежі, яка може поширитися із внутрішнього простору приміщення назовні фасаду будівлі.

Публікації, які засвідчують апробацію дисертації

7. **Ковалишин Б.**, Балло Я. До питань підвищення ефективності запобігання поширення пожежі протипожежними карнизами. *Проблеми та перспективи розвитку системи безпеки життєдіяльності: ХІХ Міжнародна науково-практична конференція молодих вчених, курсантів та студентів (28-29 берез. 2024)*. Львів: ЛДУ БЖД, 2024. С. 147–150.

Особистий внесок – досліджено вплив конструктивних параметрів протипожежних карнизів на ефективність обмеження поширення пожежі.

8. Балло Я., **Ковалишин Б.** Удосконалення установки для прогнозування поширення пожежі по фасадам будівель. *Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій*: XV Міжнародна науково-практична конференція (24 квіт. 2024). Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2024. С. 126–127.

Особистий внесок – проведено моделювання поширення пожежі зовнішніми огорожувальними конструкціями.

9. **Ковалишин Б.**, Балло Я. Дослідження впливу конструктивних параметрів протипожежних карнизів на процеси поширення пожежі. *Надзвичайні ситуації: безпека та захист*: XIV Всеукраїнська науково-практична конференція з міжнародною участю (24-25 жовт. 2024). Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2024. С. 102–103.

Особистий внесок – досліджено вплив форми, виносу карниза від стіни та інших геометричних параметрів на ефективність затримки поширення вогню.

10. Климась Р., Михайлова А., **Ковалишин Б.** Аналіз вітчизняного та зарубіжного досвіду проведення оцінки стану захищеності об'єктів критичної інфраструктури. *Екологічна безпека в умовах війни*: збірник тез доповідей V Міжнародної науково практичної конференції (21 лист. 2024). Львів: ЛДУБЖД, 2024. С. 188–190.

Особистий внесок – проведено порівняльний аналіз підходів до оцінки безпеки та формування планів захисту об'єктів критичної інфраструктури в Україні.

11. **Ковалишин Б.**, Балло Я. Програма-методика експериментальних вогневих досліджень з оцінювання обмеження поширення пожежі протипожежним карнизом. *Проблеми надзвичайних ситуацій*: Міжнародна науково-практична конференція (14 трав. 2025). Черкаси: НУЦЗ України, 2025. С. 52–53.

Особистий внесок – розробка стандартизованого підходу для перевірки

того, наскільки ефективно карниз зупиняє вертикальне поширення вогню по фасаді будівлі.

12. Балло Я., Ковалишин Б. Формування програми досліджень поширення пожежі ззовні будівлі та дослідження умов запобігання її поширення. *Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій: Матеріали XVI Міжнародної науково-практичної конференції (2 трав. 2025). Черкаси: НУЦЗ України, 2025. С. 242–243.*

Особистий внесок – аналіз чинників, які стримують поширення пожежі ззовні будівлі.

ДОДАТОК Б

Акти впровадження результатів дисертаційної роботи



МІНІСТЕРСТВО РОЗВИТКУ ГРОМАД ТА ТЕРИТОРІЙ УКРАЇНИ

пр-т Берестейський, 14, м. Київ, 01135,
 тел.: (044) 351-40-96, (044) 351-40-35, (044) 351-40-01,
 E-mail: miu@mtu.gov.ua, сайт: www.mtu.gov.ua, код згідно з ЄДРПОУ 37472062

від _____ 20__ р. № _____

На № _____ від _____ 20__ р.

Національний університет
 цивільного захисту України

Довідка про впровадження

Результати дисертаційної роботи Ковалишина Богдана Михайловича за темою «Підвищення ефективності запобігання поширення пожежі ззовні будівель протипожежними карнизами» використовуються Міністерством під час удосконалення чинної нормативної та нормативно-правової бази у будівництві в частині удосконалення вимог пожежної безпеки з метою підвищення ефективності запобігання поширення пожежі ззовні будівель.

Заступник Міністра

Наталія КОЗЛОВСЬКА



ДОКУМЕНТ СЕД

Підписувач Козловська Наталія Вікторівна
 Сертифікат 6FA97849F1B2570D0400000095C701005E030600
 Дійсний з 03.02.2025 12:33:58 по 03.02.2026 12:33:58

Міністерство розвитку громад
 та територій України



37115/26/14-25 від 16.12.2025

АКТ
впровадження результатів дисертаційної роботи
КОВАЛИШИНА Богдана Михайловича
за темою «Підвищення ефективності запобігання поширення пожежі ззовні
будівель протипожежними карнизами»

Даний акт складено про те, що в Українському союзі пожежної та техногенної безпеки впроваджено в практичну діяльність союзу результати дисертаційної роботи Ковалишина Б.М. за темою «Підвищення ефективності запобігання поширення пожежі ззовні будівель протипожежними карнизами» в частині удосконалення методів запобігання поширення пожежі ззовні будівель та застосування більш ефективних протипожежних карнизів з покращеними конструктивними характеристиками для обмеження теплового впливу на вище розташовані поверхи будівель. Застосування розробленого алгоритму підбору фасадних протипожежних перешкод дозволило покращити ефективність обмеження поширення зовнішньої пожежі для різних функціональних частин будівель та споруд.

Президент - Голова правління



Борис ПЛАТКЕВИЧ

03.12.2025



ЗАТВЕРДЖУЮ

Перший проректор

Національного університету цивільного

захисту України

навчальної роботи

Олександр ДЖУЛАЙ

18 грудня 2025 року

АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи за темою «Підвищення ефективності запобігання поширення пожежі ззовні будівель протипожежними карнизами» автора КОВАЛИШИНА Богдана Михайловича

Комісія у складі:

голови – начальника навчально-наукового інституту пожежної та техногенної безпеки, кандидата технічних наук, доцента Мельника В.П.

та членів – доцента кафедри державного нагляду у сфері пожежної та техногенної безпеки Національного університету цивільного захисту України, кандидата технічних наук, доцента Миргород О.В.;

старшого викладача кафедри державного нагляду у сфері пожежної та техногенної безпеки Національного університету цивільного захисту України Майбороди Р.І.

склали акт, який підтверджує, що результати дисертаційної роботи за темою «Підвищення ефективності запобігання поширення пожежі ззовні будівель протипожежними карнизами» мають теоретичне та практичне значення для освітнього процесу. Отримані дані та виявлені залежності, які характеризують небезпеку поширення зовнішньої пожежі і дозволяють якісно переглянути підходи щодо забезпечення ефективного її обмеження поширення при застосуванні відповідних типів протипожежних карнизів для різних функціональних зон будівель впроваджено в освітній процес на кафедрі державного нагляду у сфері пожежної та техногенної безпеки Національного університету цивільного захисту України в навчальній дисципліні «Системи забезпечення пожежної безпеки об'єктів» при підготовці здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти за спеціальністю 261 «Пожежна безпека». Впровадження результатів досліджень даної дисертаційної роботи дозволить підвищити якість провадження лекційних та практичних занять шляхом розширення знань здобувачів за рахунок практичного застосування нових наукових даних.

Голова комісії:

начальник навчально-наукового інституту пожежної та техногенної безпеки, кандидата технічних наук, доцента

Валентин МЕЛЬНИК

Члени комісії:

доцент кафедри державного нагляду у сфері пожежної та техногенної безпеки НУЦЗ України, кандидат технічних наук, доцент

Оксана МИРГОРОД

старший викладач кафедри державного нагляду у сфері пожежної та техногенної безпеки НУЦЗ України

Роман МАЙБОРОДА