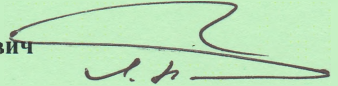


**ДЕРЖАВНА СЛУЖБА УКРАЇНИ З НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ
ЛЬВІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БЕЗПЕКИ ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ**

БАЛЛО Ярослав В'ячеславович



УДК 614.841.334

**РОЗВИТОК НАУКОВИХ ОСНОВ ЗАПОБІГАННЯ ПОШИРЕННЯ
ПОЖЕЖІ ЗОВНІШНІМИ ОГОРОДЖУВАЛЬНИМИ
КОНСТРУКЦІЯМИ БУДІВЕЛЬ**

Спеціальність 21.06.02 – Пожежна безпека
(261 – пожежна безпека)

РЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Інституті державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту, м. Київ.

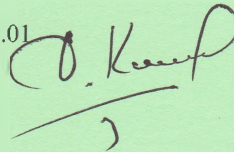
- Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор
ДЕМЧИНА Богдан Григорович,
Національний університет «Львівська політехніка»,
професор кафедри будівельних конструкцій та мостів;
- доктор технічних наук, професор
КОСТЕНКО Віктор Климентович,
Донецький національний технічний університет
МОН України,
завідувач кафедри природоохоронної діяльності;
- доктор технічних наук, професор
ОТРОШ Юрій Анатолійович,
Національний університет цивільного захисту України,
начальник кафедри пожежної профілактики в населених
пунктах.

Захист відбудеться «05» вересня 2024 року о 14:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.874.01 Львівського державного університету безпеки життєдіяльності за адресою: 79007, м. Львів, вул. Клепарівська, 35.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Львівського державного університету безпеки життєдіяльності за адресою: 79007, м. Львів, вул. Клепарівська, 35, а також на сайті спеціалізованої ради Д35.874.01, за електронною адресою: <https://ldubgd.edu.ua/content/zahisti-disertaciy-2>

Реферат розісланий «01» серпня 2024 року

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д35.874.01
кандидат технічних наук, доцент



Дмитро КОБИЛКІН

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Значна кількість пожеж поширюється між поверхами будівлі ззовні по її фасаду, з подальшим поширенням в середину приміщень через руйнування зовнішніх огорожувальних конструкцій або через руйнування заповнення світлових прорізів, в тому числі вікон. В період 2016-2023 роки кількість фасадних пожеж у будинках підвищеної поверховості (вище 26,5 м), висотних будинках (з умовною висотою вище 47 м) в Україні збільшилася фактично вдвічі, при цьому в більш ніж в 40% таких випадків фасад будинків був виконаний з негорючих матеріалів. Аналіз даних щодо фасадних пожеж будівель у світі з 1960-2021 роки показав, що якщо у 60-70-тих роках минулого століття фасадні пожежі здебільшого поширювалися на 10-15 поверхів, то у період 2000-2020-ті роки фасадні пожежі поширювалися на 20-30 поверхів, а для країн середнього сходу на 60-70 поверхів. Представлені статистичні дані можна пояснити значним збільшенням поверховості нових будівель за останні 20-30 років та сучасними архітектурними тенденціями у світі. Окрім цього, значна висота будівель та різнотипність форм їх фасадних конструкцій впливають на складність гасіння таких пожеж та проведення рятувальних робіт для пожежних підрозділів. Приклад такої пожежі наведено на рис. 1.



Рисунок 1 – Пожежа та її наслідки в житловому будинку в Південній Кореї

Запобігання поширення пожежі по фасадним конструкціям будівель є однією із основних вимог та показників безпеки будівель і споруд, пов'язаних із їх суттєвими експлуатаційними характеристиками, що в свою чергу впливає на забезпечення вимог по обмеженню поширення

вогню на сусідні будівлі і споруди та поширення вогню і диму всередині об'єкту. Разом із тим, вітчизняні та зарубіжні вимоги будівельних норм не містять умов, яких слід досягти проектувальнику за для недопущення даної небезпеки або зниження її ймовірності.

Дослідження щодо запобігання поширення пожежі по конструкціям будівель викладено зокрема в роботах Шналя Т.М., Кузика А.Д., Ніжника В.В., Яковчука Р.С., Поздееєва С.В., Сізікова О.О., Новака С.В., Ryan J., Carlsson E., Cheng H. та інших. Ці роботи в цілому спрямовані на підвищення пожежної безпеки будівельних конструкцій та зокрема фасадних систем під час застосування пожежобезпечних облицювальних матеріалів та удосконалення методів натурних вогневих випробувань. Наукові дослідження, спрямовані на підвищення ефективності засобів з обмеження поширення пожежі по фасадам будівель або пошукам шляхів забезпечення ефективності систем їх

пожежогасіння наведено в роботах Ковалишина В.В., Антонова А.В., Баланюка В.М., Kawagoe K., Oleszkiewicz I., Tang M. Слід зазначити, що в наведених роботах поза увагою залишилися процеси оцінювання поширення пожежі по фасадам будівель та не розглядалось питання щодо обґрунтування параметрів конструктивних та інженерних заходів для запобігання поширення пожежі зовнішніми огорожувальними конструкціями.

Існуючі методи визначення ефективності обмеження поширення пожежі по зовнішнім огорожувальним конструкціям будівель та обґрунтування безпечності застосування матеріалів для їх облицювання показав, що на сьогоднішній день в світі існує близько 14 методик, включаючи вітчизняний ДСТУ 9072:2021, які стандартизовані та використовуються в 29 країнах Європи 6 країнах Азії, а також в США та Австралії. Існуючі методики та відповідне випробувальні установки відрізняються як за масштабом так і за конструктивним виконанням, що значно впливає на точність результатів випробувань фасадних систем щодо пожежної небезпеки, при цьому застосовність даних методів в ряді науково-дослідних робіт є предметом дискусії, що обумовлює їх постійний процес удосконалення.

Чинні методи оцінювання пожежної небезпеки фасадних систем не передбачають можливість оцінювати обмеження поширення пожежі для фасадних систем комбінованого типу та не враховують їх конструктивні параметри, зокрема, кути прилягання суміжних площин фасадів та кути нахилу площини фасаду відносно вертикалі. Окрім цього, відсутня можливість оцінювання ефективності фасадних протипожежних перешкод різного типу для обмеження поширення пожежі. Відсутність обґрунтованих критеріїв, які характеризують небезпеку поширення пожежі по фасадам будівель та зазначені недоліки не дозволяли проводити комплексне оцінювання можливості запобігання поширення пожежі по зовнішнім огорожувальним конструкціям із врахуванням взаємозв'язків найбільш значущих чинників, що впливають на поширення пожежі по фасадам будівель або на її обмеження.

Враховуючи вищевикладене, дослідження спрямовані на розкриття закономірностей впливу конструктивних параметрів зовнішніх огорожувальних конструкцій будівель та фасадних протипожежних перешкод на процеси поширення пожежі по їх поверхні, як теоретична база для можливості запобігання поширення пожежі по негорючим фасадам будівель, що є актуальною науковою проблемою. Це дозволило розробити нові експериментальний і розрахунково-табличний методи прогнозування поширення пожежі зовнішніми огорожувальними конструкціями будівель та можливість здійснювати оцінювання ефективності заходів щодо її обмеження. В роботі досліджувалась ефективність фасадних протипожежних перешкод активного та пасивного типу встановлених на зовнішніх огорожувальних конструкціях будівель, як передумова встановлення протипожежних вимог в частині забезпечення обмеження поширення пожежі по негорючим фасадам будівель між вертикальними протипожежними відсіками.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана відповідно до основних напрямів наукової діяльності ІДУ НД ЦЗ в рамках Переліку розробок на створення науково-технічної продукції з нормування у сферах будівництва та житлової політики на 2022 рік за бюджетною програмою КПКВК 2751030 затвердженого наказом Мінрегіону № 20 від 31.01.2022, Програми робіт з національної стандартизації на 2021 рік затвердженої наказом ДП «УкрНДНЦ» від 18 березня 2021 року № 91, 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, які виконано в УкрНДНЦ та ІДУ НД ЦЗ за участю здобувача у якості керівника роботи, результати яких використано в дисертації: «Провести дослідження та встановити загальні положення системи управління пожежною безпекою об'єкта» (ДР № 0118U003463), «Обґрунтування вимог щодо оцінки стану пожежної безпеки об'єкта захисту» (ДР № 0119U102482), «Наукове обґрунтування вимог пожежної безпеки для громадських будинків з умовною висотою від 100 до 150 м» (ДР № 0120U101693), «Обґрунтування параметрів прогнозування можливості запобігання поширення пожежі зовнішніми огорожувальними конструкціями будівель» (ДР № 0122U200790).

Мета і завдання дослідження. Розкриття механізму поширення пожежі по зовнішнім огорожувальним конструкціям будівлі для запобігання поширення пожежі ззовні будівлі, як наукове підґрунтя для встановлення вимог пожежної безпеки до будівель. Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі задачі:

- проаналізувати вітчизняні, зарубіжні теоретичні та експериментальні дослідження, а також відповідну нормативну базу щодо оцінки та прогнозування поширення пожежі по зовнішнім огорожувальним конструкціям будівель та виявити шляхи запобігання поширення пожежі ззовні будівлі;

- на основі аналізу можливих сценаріїв пожежі у будівлі обґрунтувати критерії, що характеризують умови поширення пожежі ззовні будівлі з врахуванням її конструктивних параметрів, а також конструктивних параметрів фасадних протипожежних перешкод, в тому числі, технічних характеристик протипожежних систем, інтегрованих у фасадні протипожежні перешкоди;

- провести аналіз існуючих математичних моделей, які описують процеси поширення пожежі від приміщення, в якому вона виникла, з врахуванням конструктивних особливостей будівлі, до вище розташованого поверху з метою створення удосконаленого розрахункового методу розрахункової оцінки поширення пожежі ззовні по фасадам будівель;

- розробити програму експериментальних досліджень процесів поширення пожежі ззовні будівлі та дослідження ефективності застосування фасадних протипожежних перешкод для обмеження пожежі;

- створити установку прогнозування поширення пожежі ззовні будівлі для проведення експериментальних досліджень та провести відповідні експериментальні дослідження за розробленою програмою;

- на основі отриманих результатів експериментальних досліджень виявити умови поширення пожежі на вище розташований поверх в залежності зміни температур на поверхні зовнішніх огорожувальних конструкцій, проаналізувати виявлені залежності та здійснити їх кореляційний аналіз;

- дослідити взаємозв'язки найбільш значущих процесів та чинників, що впливають на поширення пожежі ззовні будівлі, порівнюючи результати експериментальних досліджень з відповідною їм газо-гідродинамічною моделлю на основі рівняння теплообміну, довести їх адекватність і оцінити точність;

- на основі отриманих закономірностей розробити методичне забезпечення для розрахункової оцінки запобігання поширення пожежі зовнішніми огорожувальними конструкціями будівлі, яке включає спрощений метод розрахунку та табличний метод визначення температури полум'я вздовж висоти фасаду;

- на основі визначених взаємозв'язків та чинників, які впливають на поширення пожежі по фасадам будівель, а також обґрунтованим критеріям що характеризують умови поширення пожежі по фасаду, розробити науково-методичний апарат, як систему що об'єднує створений метод натурних випробувань та методичне забезпечення для розрахункової оцінки запобігання поширення пожежі зовнішніми огорожувальними конструкціями будівель та оцінити економічний ефект щодо його застосування.

Об'єкт дослідження – фізичні процеси поширення пожежі зовнішніми огорожувальними конструкціями будівель з негорючим облицюванням.

Предмет дослідження – вплив конструктивних параметрів зовнішніх огорожувальних конструкцій будівель та фасадних протипожежних перешкод на процеси поширення пожежі по ним.

Методи дослідження: під час виконання дисертаційної роботи використано: комплексний аналіз і узагальнення раніше проведених робіт щодо оцінювання обмеження поширення фасадних пожеж; математичне моделювання процесів теплообміну між факелом пожежі та вище розташованими вертикальними конструкціями шляхом застосування методів стаціонарної і нестаціонарної теплопровідності, польових методів а також моделювання адіабатного процесу; методи кінцевих різниць для прогнозу результатів за алгоритмом обчислень «предиктор-коректор», метод розв'язання систем лінійних алгебраїчних рівнянь; кінцевих об'ємів для обчислень диференціальних рівнянь; метод Ейлера для розв'язання системи рівнянь Нав'є-Стокса під час відтворення процесів теплообміну між факелом пожежі та вище розташованими вертикальними конструкціями; методи інтерполяції та загального розв'язання функцій, методи вимірювання атмосферного тиску, швидкості вітру під час проведення експериментальних досліджень; метод Грабса для визначення наявності викидів та квазівикидів щодо отриманих даних досліджень; метод Фішера для тестової статистики належності дисперсій отриманих даних до однієї

генеральної сукупності; метод дихотомії для обґрунтування розміру розрахункової сітки комп'ютерних моделей; табличний метод, спрощений метод, обчислювальний метод із використанням рівняння променистого теплообміну та рівняння нестационарної теплопровідності, обчислювальний метод із використанням польових моделей для оцінювання поширення пожежі по зовнішнім вертикальним конструкціям; метод обчислення значення пожежної навантаги; метод планування, вибору кількості повторюваності та умов проведення дослідів; методи математичної статистики для аналізу отриманих результатів експериментальних вогневих досліджень.

Наукова новизна отриманих результатів. У роботі одержані нові науково обґрунтовані результати, які в сукупності забезпечують вирішення актуальної науково-прикладної проблеми у сфері пожежної безпеки, що полягає у розкритті закономірностей впливу конструктивних параметрів зовнішніх огорожувальних конструкцій будівель на зміну температур на їх поверхні під час пожежі, як підґрунтя для запобігання поширення пожежі ззовні будівлі з негорючим облицюванням.

Здобувачем *уперше* отримані наступні наукові результати:

1. Науково обґрунтовано та розроблено нову методику комплексного оцінювання поширення пожежі зовнішніми огорожувальними конструкціями будівель з негорючим облицюванням, яка дозволяє відтворювати реальні конструктивні параметри фрагменту фасаду та найбільш несприятливі умови поширення пожежі без застосування адаптації фасадних систем та будівельних матеріалів їх облицювання до існуючих стандартизованих випробувальних установок та фрагментів будинків для проведення імітаційних випробувань.

2. На основі дослідження наслідків реальних пожеж та аналізу сучасних технологій будівництва фасадних систем обґрунтовано критерії, що характеризують умови поширення пожежі у будівлі з негорючим облицюванням, які відповідають величині тривалості температурного впливу на них не менше 30 хвилин та руйнуванню заповнення світлових прорізів фасадних конструкцій при досягненні значення температури вище 250°C.

3. Розрахунковим методом доведено та експериментально підтверджено, що під час 30 хвилинного впливу вогнища пожежі класу В з питомою пожежною навантагою до 2300 МДж/м² значення температури на поверхні зовнішньої огорожувальної конструкції від впливу факелу пожежі може змінюватися:

- лінійно з 210 °С до 600 °С для фасаду будівлі, який знаходиться під кутами нахилу відносно вертикалі від -20° до +20° відповідно;

- лінійно з 90 °С до 440 °С при застосуванні протипожежного карнизу шириною з 1,5 м до 0,3 м;

- зменшуватися до 1,6 разів при застосуванні протипожежних карнизів обладнаних дренажною системою із мінімальною інтенсивністю зрошення водою 0,083 л/с·м².

4. Методами комп'ютерного моделювання виявлено закономірність, яка полягає в тому, що протипожежний карниз влаштований на зовнішній огорожувальній конструкції дозволяє знизити значення площі розподілів

критичної температури на поверхні фасаду вище розташованого поверху на 8-15% для кожного кроку збільшення в 0,1 м ширини протипожежного карнизу від 0,3 м до 1,5 м.

Удосконалено:

1. Методи оцінки запобігання поширення пожежі зовнішніми огорожувальними конструкціями, а саме метод натурних випробувань, який дозволяє враховувати реальні конструктивні параметри фасаду будівлі та спрощений метод розрахунку температури полум'я вздовж висоти фасаду, які спільно з обґрунтованими критеріями, що характеризують умови поширення пожежі по фасаду (гранична температура та тривалість її впливу), дозволяють визначити умови запобігання поширення пожежі зовнішніми огорожувальними конструкціями будівель з негорючим облицюванням.

2. Науково-методичну та експериментальну базу дослідження процесів обмеження поширення пожежі по зовнішніх огорожувальних конструкціях будівель, відмінною рисою якої є врахування реальних конструктивних параметрів фасаду будівлі, а саме кутів його ухилу, кутів прилягання суміжних площин фасаду та висоти міжповерхових віконних простінків.

Набули подальшого розвитку:

1. Підходи до підвищення достовірності прогнозування поширення пожежі зовнішніми огорожувальними конструкціями будівель або її обмеження фасадними протипожежними перешкодами.

2. Експериментально-розрахункові принципи забезпечення точності оцінювання динаміки зміни температур та характеру температурних розподілів від пожежі на поверхні вище розташованих зовнішніх огорожувальних конструкцій в залежності від кутів нахилу основної фасадної площини та куту прилягання бокової площини фасаду до основної частини фасаду, та забезпечено відтворюваність результатів експериментальних досліджень, при яких значення абсолютних відхилень між усередненими експериментальними дослідженнями не перевищують 10%.

Практичне значення отриманих результатів. Практична цінність досліджень полягає у створенні науково-методичного апарату, що включає створений метод натурних випробувань, спрощений метод розрахунку температури полум'я вздовж висоти фасаду, а також табличний метод визначення температури полум'я вздовж висоти фасаду, що спільно з обґрунтованими критеріями, які характеризують умови поширення пожежі по фасаду, дозволяє визначити умови запобігання поширення пожежі зовнішніми огорожувальними конструкціями будівель з негорючим облицюванням та реалізувати параметричний метод нормування вимог пожежної безпеки до таких будівель.

Систематизовано фасадні протипожежні перешкоди, як елемент зовнішньої огорожувальної конструкції для забезпечення обмеження поширення пожежі по фасаду будівлі, при цьому визначено їх пасивний тип (протипожежні карнизи, евакуаційні балкони, міжповерхові віконні простінки, протипожежні фасадні віконні карнизи), активний тип (дренчерні зрошувачі, протипожежні карнизи обладнані дренчерними зрошувачами, кінетичні фасадні системи) та комбінований тип

(протипожежні карнизи або протипожежні віконні штори обладнані дренчерними зрошувачами) для запобігання поширення пожежі.

Розроблена науково-методична та експериментальна база стала підґрунтям для створення нормативного забезпечення щодо оцінювання процесів поширення пожежі на вище розташовані поверхи зовнішніми огорожувальними конструкціями будівель і впроваджена при розробці державних будівельних норм ДБН В.2.2-41:2019 «Висотні будівлі. Основні положення»; національного стандарту ДСТУ 9192:2022 «Пожежна безпека. Проектування висотних громадських будівель з умовною висотою від 100 м до 150 м». Результати проведених досліджень також впроваджені у навчальний процес Черкаського інституту пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України при викладанні дисциплін «Пожежна безпека територій, будівель та споруд» та «Пожежна профілактика в населених пунктах» (акт від 23.01.2024 року), у діяльність Департаменту запобігання надзвичайним ситуаціям ДСНС України (акт від 09.01.2024 року), ПАТ «ПОЗНЯКИ-ЖИЛ-БУД» (акт від 18.01.2024 року), ПАТ Український зональний науково-дослідний і проектний інститут по цивільному будівництву (акт від 11.01.2024 року), у наукову діяльність Інституту державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту (акт від 05.12.2023 року).

Результати дисертаційної роботи втілено в розробку одного патенту України на корисну модель.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень та отриманих висновків підтверджується використанням відомих систем диференційних рівнянь тепломасообміну; методів стаціонарної і нестаціонарної теплопровідності, а також задовільною збіжністю розрахункових і експериментальних даних, отриманих під час дослідження процесів поширення пожежі зовнішніми огорожувальними конструкціями.

Особистий внесок здобувача. полягає в обґрунтуванні актуальності науково прикладної проблеми у сфері пожежної безпеки, самостійному формулюванні мети і завдань досліджень, об'єкту та предмету досліджень, здійсненні аналізу вітчизняних та закордонних джерел інформації, обґрунтованості суджень, удосконаленні та розробленні методів і методик досліджень, організації та проведенні експериментальних досліджень, а також в обробленні їх результатів та формуванні висновків. Дисертація є самостійною роботою автора. Всі положення, винесені на захист, та результати їх застосування приведені в роботах [1 – 39].

В наукових роботах, що опубліковані у співавторстві, особистий внесок здобувача полягає у наступному. В роботі [1] – проведено дослідження впливу пожежі зовнішньої інженерної установки та оцінено ризик розвитку поширення пожежі по фасад будівлі; у роботі [2] – проведено моделювання зовнішньої пожежі на прикладі електромобілю та здійснено розрахунок можливих теплових розподілів на фасаді будівлі та потенційних наслідків від її дії; в [3] – проведено дослідження впливу нахилів фасаду на процеси поширення фасадної пожежі; в [4] – проведено моделювання зовнішньої пожежі на технологічній установці

здійснено розрахунок негативних наслідків від її дії на фасад суміжно розташованого об'єкту; у [5] – проведено теоретичні дослідження щодо характеру можливої зовнішньої пожежі на об'єкті та аналізу методики визначення необхідної кількості води на її ліквідацію; в [6] – проведено аналіз методів дослідження об'єкту захисту та оцінки його протипожежного стану; в [7] – досліджено сценарії початкового розвитку пожежі у житлових та громадських будинках та обґрунтування її температурного режиму; в [8] – проведено аналіз літературних джерел та обґрунтовано нові методичні підходи процедури проведення оцінки стану об'єкту з питань пожежної безпеки; у [9] – проведено аналіз вітчизняних та закордонних будівельних норм в частині сучасних підходів протипожежного захисту висотних будівель та споруд від фасадних пожеж; у [10] – здійснено аналіз та систематизацію причин та їх наслідків пожеж у висотних будинках; у [11] – дослідження впливу зміни конструктивних параметрів протипожежних карнизів на процеси обмеження поширення пожежі по фасадах будівель та виявлено шляхи їх удосконалення; у [12] – узагальнено та систематизовано вимоги країн Європи щодо забезпечення пожежної безпеки до фасадних систем будівель різного функціонального призначення; в роботі [13] – проведено FDS моделювання та виявлено залежності впливу конструктивних параметрів протипожежних карнизів на температурні розподіли від дії пожежі на поверхні вище розташованого фасаду; у [14] – обґрунтовано основні вимоги пожежної безпеки до фасадів висотних будівель та запропоновані нові підходи щодо обмеження розвитку фасадних пожеж, які реалізовано у вимогах ДСТУ 9192; в [15] – здійснено аналіз та систематизовано основні чинники, які впливають на розвиток фасадної пожежі або навпаки на її обмеження; у [16] – обґрунтовано протипожежні вимоги до фасадів будівель на яких улаштовується станція зарядки електромобілів; у [17] – здійснено аналіз та систематизовано недоліки основних методів оцінювання пожежної небезпеки фасадних систем; у роботі [20] – презентація результатів конфігурації установки для прогнозування поширення пожежі по фасадах будівель; в [21] – створення математичних моделей тепломасообміну в разі пожежі класу В; в [22] – математичне моделювання пожежі та оцінка потенційних наслідків; в [23] – аналіз результатів досліджень щодо характеру впливу вогнища пожежі класу Б на процеси поширення пожежі по фасаду будівлі; в [24] – обґрунтовано параметри системи зовнішнього пожежогасіння фасаду та покрівлі будівлі 4 енергоблоку Чорнобильської АЕС; в [25] – проведено моделювання фасадної пожежі та зроблено висновки щодо її наслідків в разі застосування фасадних протипожежних перешкод різних типів та конструктивних параметрів; в [26] – обґрунтовано проблемні аспекти подавання води на пожежогасіння висотних будівель; в [27] – представлення вимог пожежної безпеки для висотних будівель; в [28] – математичне моделювання впливу різних типів фасадних протипожежних перешкод на процес поширення пожежі; у [29] – математичне моделювання впливу конфігурації фасадних протипожежних перешкод на процес поширення пожежі; у [30] – вивчення зміни характеру пожежі під час вітрового впливу; у [31] – оцінка наслідків від фасадної пожежі в результаті займання

кондиціонерного блоку; у [32] – обґрунтування критеріїв, які характеризують небезпеку фасадної пожежі; у [33] – дослідження зміни характеру гасіння фасадної пожежі під час вітрового впливу; в роботі [34] – висвітлено нормативні аспекти забезпечення умов обмеження фасадних пожеж; у [35] – проведено обґрунтування типу модельного вогнища пожежі під час проведення випробувань; у [36] – створення комп'ютерних моделей, що відображають процес поширення фасадної пожежі; у [37] – приведено можливі шляхи удосконалення існуючих методів оцінювання пожежної небезпеки фасадів; у роботі [38] – приведено вплив наявності систем протипожежного захисту на швидкість розвитку пожежі; у роботі [39] – представлення результатів математичного моделювання процесу оцінки ефективності обмеження поширення пожежі при застосуванні протипожежних карнизів. Праці [18;19] підготовлені самостійно.

Апробація результатів дисертації. Основні результати досліджень доповідались, обговорювались та отримали позитивне схвалення на міжнародних та національних науково-практичних конференціях: XX-й Всеукраїнській науково-практичній конференції «Сучасний стан цивільного захисту України та перспективи розвитку» (м. Київ, 2018 р.); XI-й Всеукраїнській науково-практичній конференції з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист» (м. Черкаси, 2019 р.); III-й Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми техногенної та екологічної безпеки: освіта, наука, практика» (м. Харків, 2019 р.); I-му Львівському науковому форумі міжнародної науково-практичної конференції «Пріоритетні напрямки досліджень в науковій та освітній діяльності» (м. Львів, 2019 р.); XI-й Міжнародній науково-практичній конференції «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій» (м. Черкаси, 2020 р.); V-й Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми надзвичайних ситуацій» (м. Харків, 2020 р.); VI Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми надзвичайних ситуацій» (м. Харків, 2021 р.); VIII-й Міжнародній науково-практичній конференції молодих учених «Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту» (м. Харків, 2021 р.); 9-тій міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті» (м. Харків, 2021 р.); XIII Міжнародній науково-практичній конференції «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій» (м. Черкаси, 2022 р.); VII-й Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми надзвичайних ситуацій» (м. Харків, 2022 р.); XII-й Всеукраїнській науково-практичній конференції з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист» (м. Черкаси, 2022 р.); III-й Всеукраїнській науково-практичній конференції з міжнародною участю «Актуальні проблеми пожежної безпеки та запобігання надзвичайним ситуаціям в умовах сьогодення» (м. Львів, 2022 р.); 3-rd International scientific and practical conference (м. Лондон, 2023); XIV-й Міжнародній науково-практичній конференції «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних

ситуацій» (м. Черкаси, 2023 р.); XVI-й Міжнародній науково-практичній конференції молодих вчених, курсантів та студентів «Проблеми та перспективи розвитку системи безпеки життєдіяльності» (м. Львів, 2023 р.).

Публікації. За результатами дисертаційної роботи опубліковано 39 наукових праць: 19 статей у наукових виданнях (з них 3 статті у виданнях, які включені до міжнародної наукометричної бази даних Scopus, 1 стаття в міжнародному науковому виданні, 15 статей у наукових фахових виданнях України, 1 статті, яка додатково відображає наукові результати дисертації), 18 тез доповідей на міжнародних та вітчизняних наукових конференціях та 1 патент на корисну модель.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається із вступу, 7 розділів, загальних висновків, списку використаних літературних джерел з 332 найменувань, містить 401 сторінок друкованого тексту (з них 299 сторінок основного тексту), 38 таблиць, 143 рисунки, 4 додатки.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету, задачі, об'єкт і предмет досліджень, відображено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, дані щодо апробації, а також публікації її результатів.

У першому розділі «Аналіз сучасного стану досліджень запобігання поширення пожежі зовнішніми огорожувальними конструкціями будівель» наведено аналіз існуючих основних конструктивних типів фасадних систем та досліджено наслідки фасадних пожеж для будівель із складною формою їх архітектурного виконання. Виявлено, що форма фасаду будинку, кути прилягання суміжних площин фасадів, вертикальні кути ухилу/схилу та наявність систем пожежогасіння в значній мірі впливали на розвиток пожежі та відповідно на наслідки, які вона спричиняла. Встановлено, що на сьогоднішній день відсутні залежності, які б дозволили визначали мінімально необхідний розмір протипожежних карнизів або їх форму в залежності від типу конструкції фасадної системи.

Наведене обумовило здійснити аналіз основних методів оцінювання обмеження поширення пожежі по фасадам будівель, конструктивні характеристики випробувальних установок, принципи застосування засобів і вимірювальної техніки на основі чого систематизовано відповідні переваги та недоліки існуючих підходів. Встановлено, що існуючі методики та відповідне випробувальне обладнання відрізняються як за масштабом так і за конструктивним виконанням, що значно впливає на результати випробувань фасадних систем щодо пожежної небезпеки та забезпечує лише опосередковану точність результатів. Серед основних недоліків існуючих методик оцінювання поширення пожежі відзначено:

- відсутня можливість дослідження фасадних систем комбінованого типу конструктивного виконання;

- відсутня можливість оцінювання поширення пожежі при умовах наявності прилягання суміжних площин фасадів під різними кутами;
- фрагменти фасадної системи, що випробовуються не в змозі змінювати кут площини фасаду відносно вертикалі для імітації кутів нахилу фасадів будівель;
- відсутня можливість досліджувати ефективність фасадних протипожежних перешкод різного типу для обмеження поширення пожежі.

На основі аналізу приведених конструктивних та інженерних заходів обмеження поширення пожежі зовнішніми вертикальними будівельними конструкціями для різних типів фасадних систем, систематизовано основні типи фасадних протипожежних перешкод, що наведено на схемі рис. 2.

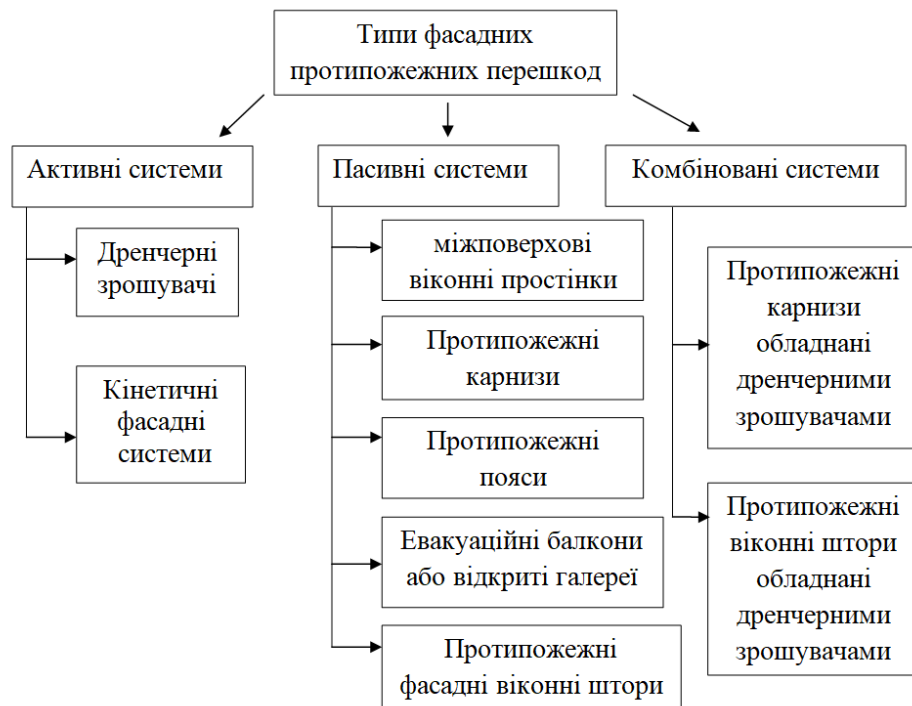


Рисунок 2 - Систематизація основних типів фасадних протипожежних перешкод

Визначені умови, які впливають на процеси поширення пожежі зовні будівель із негорючим облицюванням обумовили необхідність дослідження відповідних теоретичних методів прогнозування поширення пожежі по фасадам будівель. Базовим рівнянням, яке застосовується для визначення значення температури біля поверхні вікна поверху, який знаходиться вище поверху пожежі є наступна залежність:

$$T_z = (T_w - T_0) \times [1 - 0,4725(L_f w_v / Q)] + T_0, \text{ (K)}, \quad (1)$$

де: T_w - максимальне значення температури полум'я на рівні верхнього краю вікна поверху пожежі (К); T_0 - температура навколишнього середовища, К; L_f - відстань вздовж осі від верхнього вікна до точки, для якої робиться

розрахунок, м; W_t – ширина вікна приміщення, де відбулася пожежа, м; Q – питома теплота згоряння, Дж/кг; $L_f \cdot w_t / Q < 1$.

Під час формулювання умови поширення пожежі використано залежність:

$$\frac{Z_{sp}(= 0.6H + L_{sp})}{Z_f} = 0.8 \left(\frac{\dot{q}_{t,max}''}{\dot{q}_{cr}''} \right)^{1/2} \quad \text{if } \dot{q}_{cr}'' \leq \dot{q}_{t,max}'' \quad (2)$$

де: H – висота отвору вікна, м; Z_{sp} – відмітка розташування нижньої частини вікна, м; L_{sp} – осьова довжина полум'я, м; Z_f – відмітка розміщення вогнища пожежі, м; $\dot{q}_{t,max}''$ – максимальне значення теплового потоку в зоні суцільного полум'я, Вт; \dot{q}_{cr}'' – критичне значення теплового потоку для матеріалу, Вт.

Разом з цим, недоліком застосування такого підходу є те, що представлені залежності залишають ряд невирішених питань щодо обґрунтування типу модельного вогнища пожежі, тривалості проведення випробувань, обраних геометричних параметрів отвору, що відтворює вікно приміщення де імітується пожежа, кутів прилягання суміжних фасадів, вертикальних кутів нахилів фасаду. На основі вищенаведеного, зроблено припущення про можливість використання удосконаленого підходу з визначення температури полум'я біля поверхні зовнішніх огорожувальних конструкцій заснованого на застосуванні уточнюючих емпіричних коефіцієнтів, що дозволять більш точно та комплексно прогнозувати можливість поширення пожежі по фасадам будівель та здійснювати оцінку ефективності інтегрованих фасадних протипожежних перешкод.

У другому розділі «Теоретичні механізми досліджень процесів поширення пожежі зовнішніми огорожувальними конструкціями будівлі» на основі аналізу літературних джерел визначено перелік найбільш значущих параметрів, які характеризують температурний вплив від пожежі на вище розташовану конструкцію та відповідно приведена їх числова реалізація. Також запропоновані найбільш характерні розрахункові початкові сценарії пожежі та розглянуто їх температурний вплив на вище розташовані зовнішні огорожувальні конструкції будівлі, які доцільно розглядати під час оцінювання поширення фасадної пожежі, а саме: через відкриті світлові прорізи в огорожувальних конструкціях будівлі та від пожежі зовнішньої технологічної установки встановленої на фасаді будівлі.

Для вирішення поставлених задач використано рівняння нестационарної теплопровідності:

$$c_p \rho \frac{\partial T_p}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T_p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T_p}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T_p}{\partial z} \right), \quad (3)$$

де: t – час теплового опромінювання, с; λ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу або речовини, Вт/(м·°C), c_p – питома теплоємність матеріалу або речовини, Дж/(кг·°C), ρ – густина матеріалу або речовини, кг/м³.

Під час визначення теплообміну між факелом пожежі та поверхнею вище розташованої зовнішньої огорожувальної конструкції застосовано рівняння

перенесення променевого теплообміну:

$$\sum_{j=1}^N (\delta_{ij} - \varphi_{ij}) \sigma T_j^4 = \sum_{j=1}^N \frac{1}{A_j} \left(\frac{\delta_{ij}}{\varepsilon_j} - \varphi_{ij} \frac{1 - \varepsilon_i}{\varepsilon_j} \right) q_j, \quad (4)$$

де: δ_{ij} – параметр, який дорівнює 1 при, якщо $i=j$, та дорівнює 0, якщо $i \neq j$, i, j – кількість елементів, на які розбивається поверхня, що випромінює тепло та опромінюється теплом відповідно, q_j – кількість теплоти, що передається від i поверхні, до j поверхні, $D_j, \varphi_{i,j}$ – кутовий коефіцієнт опромінювання.

За рівнянням (4) визначають тепловий потік на границі розрахункових областей та встановлюють граничні умови другого роду для вирішення нестационарного рівняння теплопровідності (3)

$$\lambda \left. \frac{\partial T_{pj}}{\partial r_j} \right|_{r_j} = Q_j, \quad (5)$$

де: r_j – відстань між центрами елементів i та j , м.

Для реалізації польового методу, що заснований на розв'язанні повної системи рівнянь Нав'є – Стокса, який включає:

- рівняння збереження маси:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \vec{u} = \dot{m}_b^m, \quad (6)$$

де: t – час, с; ρ – густина, кг/м³; \vec{u} – вектор відносної швидкості, $\dot{m}_b^m = \sum_a \dot{m}_{b,a}^m$ - швидкість утворення газових компонентів в наслідок випаровування, \vec{u} - двохелементний тензор, в матричній системі $\vec{u} = [u, v, w]^T$, що представлений тензорним добутком векторів u та u^T ;

- рівняння збереження імпульсу:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u) + \nabla \cdot \rho u u + \nabla p = \rho g + f_b + \nabla \cdot \tau_{ij}, \quad (7)$$

де: p – тиск, Н/м², f_b – зовнішня сила, наприклад, такі як опір руху через краплі рідини, Н, τ_{ij} - тензор напруги;

- рівняння збереження енергії:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho h_s) + \nabla \cdot \rho h_s u = \frac{Dp}{Dt} + \dot{q}^m - \dot{q}_b^m - \nabla \dot{q}^n - \varepsilon, \quad (8)$$

де: h_s – ентальпія є функцією температури, $h_s = \sum_a Y_a h_{s,a}$, $h_{s,a}(T) = \int_{T_0}^T C_{p,a}(T') dT'$, $\frac{Dp}{Dt} = \frac{dp}{dt} + u \nabla p$, \dot{q}^m - швидкість виділення тепла на одиницю

об'єм із хімічної реакції, \dot{q}_e^m - витрачена енергія на випаровування крапель, \dot{q}^n - конвективні та радіаційні теплові потоки, ε - енергія розсіювання, $\dot{q}^n = -k\nabla T - \sum_a h_{s,a}\rho D_a\nabla Y_a + \dot{q}_r^n$;

- рівняння стану газу, що встановлює зв'язок механічних параметрів та температури:

$$p = \frac{\rho RT}{W}, \quad (9)$$

де: R – універсальна газова стала.

З врахуванням усієї сукупності поверхонь матеріалів кінцевих елементів, які обмінюються випромінюванням, складалася система нелінійних рівнянь у матричній формі. Приведені залежності трансформувалися для дво- та одновимірних випадків (температури плоскої області на площині XYZ та стрижнів). Крім того, основні рівняння доповнювалися математичними моделями, що мають враховувати супутні явища, а саме: модель конвективних та радіаційних потоків, модель горіння, модель турбулентності тощо.

У третьому розділі «Оцінювання процесів поширення пожежі зовнішніми огорожувальними конструкціями будівлі за допомогою обчислювальної газо-гідродинаміки» з метою обґрунтованості запропонованих обчислювальних гідродинамічних моделей теплового випромінювання, які чисельно вирішує рівняння Нав'є-Стокса для низькошвидкісних температурно-залежних потоків під час горіння проведено їх верифікацію та оцінювання. Оцінювання процесів поширення пожежі здійснювалося за допомогою програми FDS, яка моделює сценарії пожежі з використанням обчислювальної гідродинаміки (CFD), оптимізованої для низькошвидкісних температурно-залежних потоків.

На основі систематизованих основних чинників, які безпосередньо впливають на проведення оцінювання поширення пожежі по фасадах або дослідження ефективності застосування інтегрованих фасадних протипожежних перешкод (активних чи пасивних) проведено дослідження потенційного впливу пожежі на процеси її поширення по зовнішнім огорожувальним конструкціям будівлі різних типів. Серед критеріїв, які характеризують умови поширення пожежі по фасаду будівлі є досягнення критичного значення температури, яке відповідає величині температури руйнування заповнення світлових прорізів фасадних конструкцій, зокрема віконних елементів.

Проведено моделювання фасадної пожежі при її зовнішньому осередку утворення в результаті займання кондиціонерного блоку. За результатом моделювання визначено, що вертикальна проекція теплового розподілу по поверхні фасаду шириною від 1,2 м до 1,7 м із температурою прогріву негорючого фасаду в межах 250–265 °C може бути потенційною причиною руйнування конструкції вікон та як наслідок поширення пожежі в середину приміщення вище розташованого поверху.

Здійснено моделювання та аналіз впливу фасадної пожежі в разі утворення її осередку в середині приміщення з подальшим впливом на зовнішні

огороджувальні конструкції вище розташованих поверхів будинку. При цьому, досліджено вплив конструктивних параметрів фасадних протипожежних перешкод, які встановлено на межі протипожежних відсіків для запобігання поширення пожежі у висотних будинках. В основу розрахунків покладено сценарій, коли пожежа виникає в приміщенні квартири висотного будинку. У місці безпосереднього її виникнення вікна відчинені, а утворений тепловий потік та полум'я вільно поширюються із вікон квартири.

За результатом отриманих даних зроблено попередні висновки, що наявність протипожежного карнизу для даного випадку конструктивного виконання будинку забезпечувало зниження температури на рівні поверху розташованого над поверхом пожежі з 790-810 °С до значень в 420-455 °С в однаковий час моделювання. Дане явище можна обґрунтувати зменшенням безпосереднього контакту полум'я умовної пожежі з фасадом, а також створення «резервуару» повітряного ізолювання простору безпосередньо над карнизом. Разом із тим, під час моделювання даного сценарію пожежі, через виявлено закономірність збільшення площі прогріву фасаду для прямих протипожежних карнизів не обтічної форми. Зроблено припущення, що прямий контакт турбулентного теплового потоку від пожежі з перешкодою необтічної форми може збільшувати площу критичного прогріву фасаду будинку під протипожежним карнизом та над ним.

Розрахункові схеми, що розроблені для моделі із використанням рівняння нестационарної теплопровідності та польової моделі наведені на рис. 3.

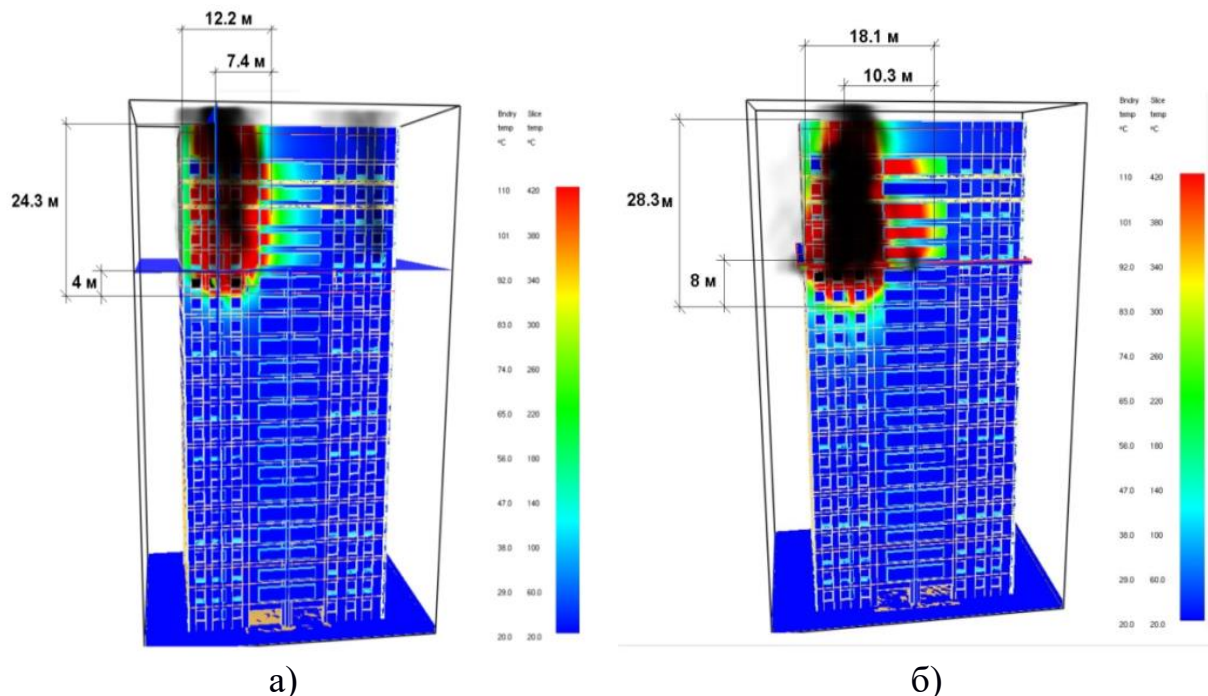


Рисунок 3 – Розподіл по фасаді температурних полів від пожежі у висотному будинку: а) – при наявності протипожежного карнизу; б) – при відсутності протипожежного карнизу

Серед нестандартних розрахункових сценаріїв розглянуто моделі фасадної пожежі, що поширюється у будівлі із внутрішнім замкнутим двором (атріумом).

Вивчення потенційної небезпеки пов'язано не тільки з дослідженнями можливого характеру поширення пожежі по зовнішнім огорожувальним конструкціям будівлі але і впливу на протилежно розташовану частину фасаду. Під час створення комп'ютерної моделі об'єкту відтворено його внутрішні об'ємно-планувальні рішення на поверхнях на базі існуючого проекту будівлі готелю, а також пожежне навантаження у приміщеннях. Результати моделювання показали, що для даних умов конструктивного виконання будівлі максимальне значення температури на поверхні протилежно розташованого фасаду внутрішнього дворового простору будівлі склало до 176 °С. Таким чином, граничні умови руйнування склопрозорої фасадної системи, з протилежної сторони будівлі відносно зони осередку поширення пожежі, не досягаються. Разом із тим, екрануючий ефект від пожежі в замкнутому дворовому просторі будівлі може сприяти більш швидкому поширенню пожежі на верхні поверхи об'єкту та створити передумови для її поширення на суміжні фасади будівлі. Окрім цього, дані умови є передумовою для створення додаткових ризиків під час гасіння пожежі пожежно-рятувальними підрозділами та організації процесу проведення рятувальних робіт. Дані проведених досліджень наведені на рис. 4.

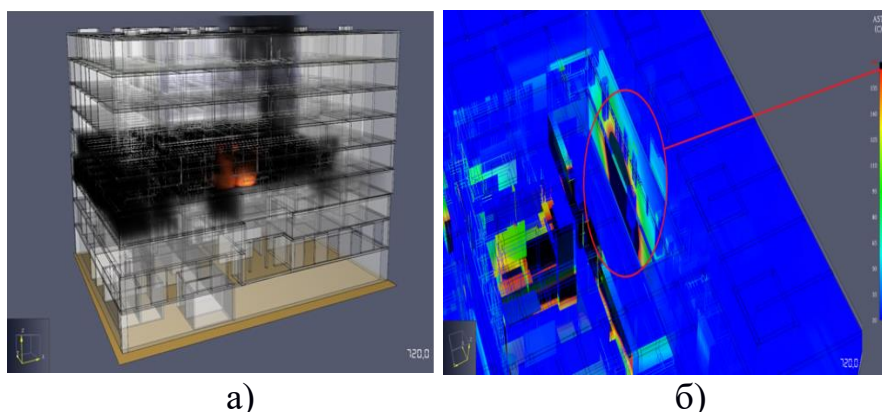


Рисунок 4 – Розподіл температури по фасаду будівлі при тепловому впливі пожежі: а) – загальний вигляд пожежі в будівлі; б) температурні розподіли по фасаду в результаті теплового впливу від пожежі; в) – температурні розподіли по фасаду будівлі із внутрішнім замкнутим двором

Таким чином, отримані результати підтверджують реалізацію запропонованої ідеї щодо можливості дослідження наслідків від фасадних пожеж за допомогою комп'ютерних моделей обчислювальної газогідродинаміки, які забезпечують досить точні прогнози щодо характеру поширення пожежі по зовнішнім огорожувальним конструкціям з врахуванням можливості застосування активних та пасивних фасадних протипожежних перешкод. Також показана адаптація та універсальність газогідродинамічної моделі з урахуванням найбільш значущих факторів поширення пожежі по зовнішнім огорожувальним конструкціям, при цьому досягається позитивний економічний ефект під час обґрунтування типу та раціональних конструктивних характеристик для фасадних протипожежних

перешкод в разі необхідності їх застосування.

У четвертому розділі «Експериментальні дослідження запобігання поширення пожежі зовнішніми огорожувальними конструкціями» наведено програму-методику експериментальних досліджень, що необхідно виконати для встановлення закономірностей впливу параметрів зовнішніх огорожувальних конструкцій будівель на процеси зміни температур біля їх поверхні під час пожежі (далі - Програма).

В основу Програми покладено дослідження процесів теплообміну від полум'я вогнища пожежі, яке вільно поширюється з отвору, що імітує вікно приміщення до вище розташованої зовнішньої огорожувальній конструкції, при її змінних конструктивних параметрах.

Розроблюване обладнання для проведення натурних вогневих досліджень, а саме установка для прогнозування поширення пожежі по фасадам будівель (далі - Установка) має наступні удосконалені конструктивні характеристики:

- рамно-каркасну основу для можливості монтажу фасадних систем різних типів та способів конструктивного виконання;

- досліджуваний фрагмент фасадної системи має змогу змінювати кут площини фасаду відносно вертикалі для імітації кутів ухилу фасадів будівель;

- установка включає бокову рухому площину, що прилягає до основної частини фасадної системи з можливістю зміни кута прилягання для імітації кутових фасадів. Зазначена прилегла площина змінює кут прилягання від 90° до 180° .

- можливість кріплення протипожежних карнизів для обмеження поширення пожежі;

- відтворення реальних параметрів міжповерхових віконних простінків (як мінімальну так і максимальну нормативну відстань).

Тобто, нова Програма експериментальних досліджень закладає в основу новий підхід, який ґрунтується на відтворенні конструктивних параметрів фрагменту фасадної системи та найбільш несприятливих умов розвитку пожежі, а не адаптації фасадних систем та будівельних матеріалів їх облицювання до існуючих стандартизованих стендів, установок та фрагментів будинків для проведення імітаційних випробувань. Даний підхід дозволяє забезпечити комплексне оцінювання можливості поширення пожежі для досліджуваного типу фасаду з врахуванням його об'ємно-конструктивних особливостей та матеріалів, які використані в його конструкції.

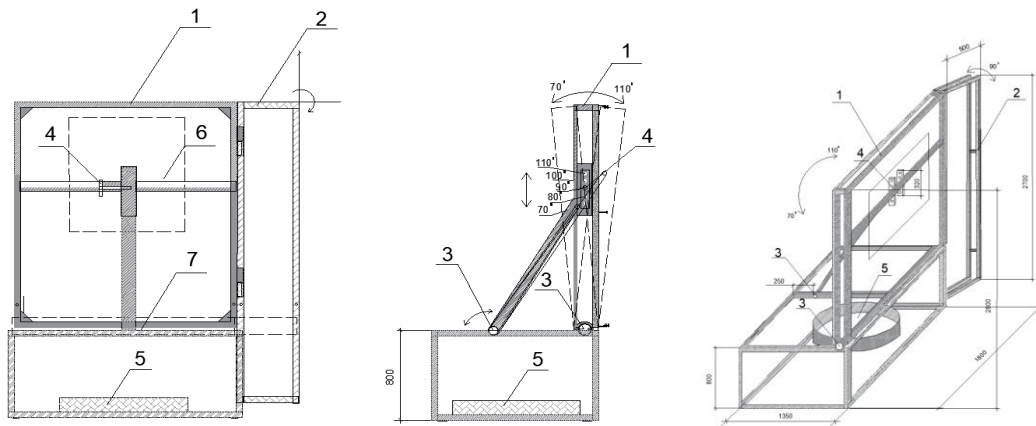


Рисунок 5 – Конструкція Установки для дослідження поширення пожеж фасадами будівель: 1 - основна рама для кріплення фрагменту фасадної системи; 2 - кутова рама для кріплення фрагменту фасадної системи; 3 - шарнір для регулювання кута встановлення площини фрагменту фасадної системи; 4 - фіксуючий гвинт; 5 - металеве деко модельного вогнища класу В; 6 - зона влаштування віконного прорізу; 7 - зона влаштування протипожежного карнизу.

Для вимірювання температури біля поверхні фрагменту фасадної системи на відстані в межах 1÷2 мм від площини фасаду встановлюються термопари, які рівномірно розподілені по рівнях відстані від краю вогневої камери, що імітує вікно приміщення, де відбувається пожежа, а саме 400 мм, 800 мм, 1400 мм. На основі даних від термопар, що фіксують температурний режим будуються графіки температурних залежностей в часі для кожної досліджуваної зони фасаду. Також температура фіксується на рівні верхнього краю вогневої камери, що імітує вікно приміщення, де відбувається пожежа. В якості додаткового засобу фіксації теплових розподілів на поверхні досліджуваного фрагменту фасадної системи використовується тепловізор, а для дослідження характеру поширення полум'я застосовується фото-відео апаратура.

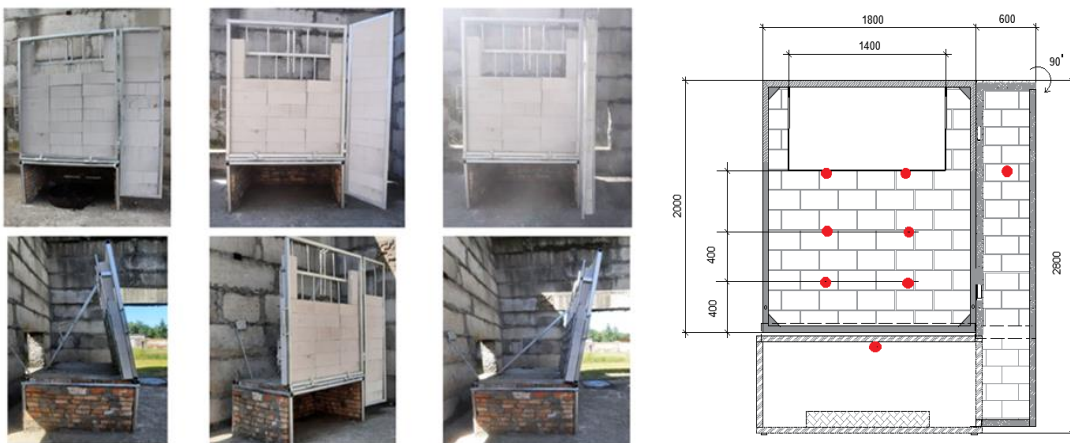


Рисунок 6 – Трансформація установки при дослідженні різних параметрів розвитку пожежі та схема влаштування термопар на площині досліджуваного зразка фасадної системи (позначено червоним кольором)

Критерієм поширення пожежі на вище розташований поверх, зокрема в середину його приміщення, є температура руйнування конструкції світлопрозорого елемента (вікна), а саме 250 °С протягом 12 хвилин.






В якості моделі відтворення пожежі прийнято вогнище пожежі класу В з пожежною навантагою 2290 МДж/м², яке встановлено в об'ємі вогневої камери Установки, у яке заливають 60 л дизельного палива або синтетичного мастила. Даний тип палива та його кількість забезпечує горіння в даному типі дека у продовж 30 хвилин із робочим діапазоном температури в межах 700-1100°С. Дана тривалість випробувань обумовлена найбільшим значенням межі вогнестійкості для конструкції зовнішніх несучих стін будівлі I ступеню вогнестійкості. Тобто, даний тип вогнища пожежі задовольняє вимоги пожежної навантаги для приміщень житлового, адміністративного та громадського призначення, що згідно з нормами становить в межах 300-780 МДж/м².

Таким чином, нова Програма експериментальних досліджень закладає в основу новий підхід, який ґрунтується на відтворенні конструктивних параметрів фрагменту фасадної системи та найбільш несприятливих умов розвитку пожежі, а не адаптації фасадних систем та будівельних матеріалів їх облицювання до існуючих стандартизованих стендів, установок та фрагментів будинків для проведення імітаційних випробувань.

У п'ятому розділі «Результати експериментальних досліджень поширення пожежі зовнішніми огорожувальними конструкціями будівель» наведені отримані результати експериментальних досліджень, а саме закономірності впливу конструктивних параметрів зовнішніх огорожувальних конструкцій будівель та фасадних протипожежних перешкод на процеси зміни температур на їх поверхні під час пожежі. Даний етап досліджень імітує випадки вільного поширення пожежі по зовнішнім огорожувальним конструкціям при граничних умовах положення площини фрагменту фасадної системи та суміжних площин фасадів, які змонтовано на установці для прогнозування поширення пожежі по фасадам будівель, а саме розглядаються наступні серії досліджень, які наведено в табл. 1:

Таблиця 1 – Основні серії експериментальних досліджень

Зовнішній вигляд фрагменту фасадної конструкції змонтованої на установці для прогнозування поширення пожежі по фасадам будівель	Фото експериментальних досліджень	Конструктивний опис досліджуваного фрагменту фасаду
1 серія досліджень		
		<p>Розміщення досліджуваного фрагменту фасадної системи під кутом 0°, відносно вертикалі. Прилегла частина фасаду розміщена під кутом 180° відносно основної площини</p>

2 серія досліджень		
		Розміщення досліджуваного фрагменту фасадної системи під кутом 0° , відносно вертикалі. Прилегла частина фасаду розміщена під кутом 90° відносно основної площини
3 серія досліджень		
		Розміщенням досліджуваного фрагменту фасадної системи під кутом $+20^\circ$, відносно вертикалі. Прилегла частина фасаду розміщена під кутом 180° відносно основної площини
4 серія досліджень		
		Розміщенням досліджуваного фрагменту фасадної системи під кутом $+20^\circ$, відносно вертикалі. Прилегла частина фасаду розміщена під кутом 180° відносно основної площини

За результатом першого етапу експериментальних досліджень побудовано графіки зміни температури на поверхні дослідних зразків фасадів в залежності від тривалості температурного впливу пожежі. Кожна крива відповідає температурному режиму, який фіксувався відповідними термопарами на рівнях 400 мм, 800 мм та 1400 мм від верхнього краю вогневої камери, що встановлені на поверхні досліджуваного фрагменту зовнішньої огорожувальної конструкції. Результати вимірювань представлені на рис. 7-8.

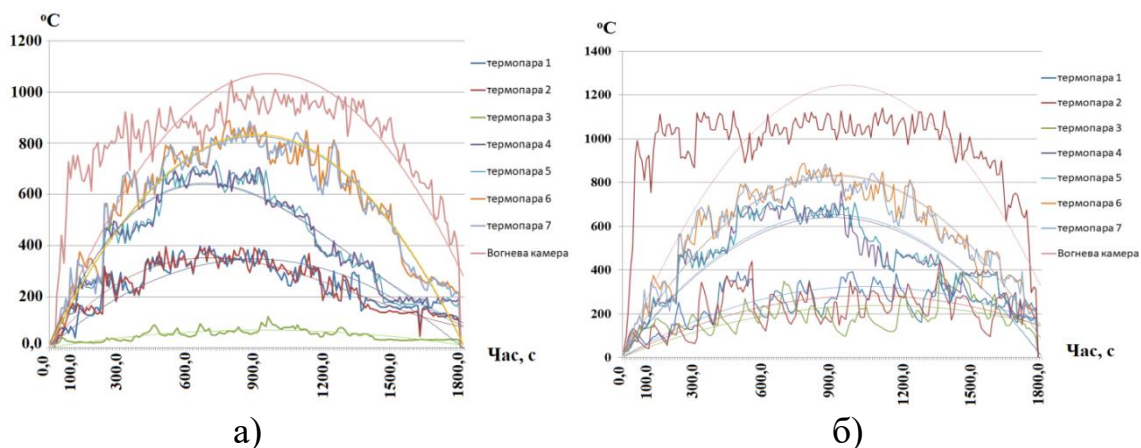


Рисунок 7 – Динаміка зміни температури на поверхні фасаду для сценаріїв:
 а) фасад під прямим кутом; б) фасад під прямим кутом, прилегла частина фасаду розміщена під кутом 90°

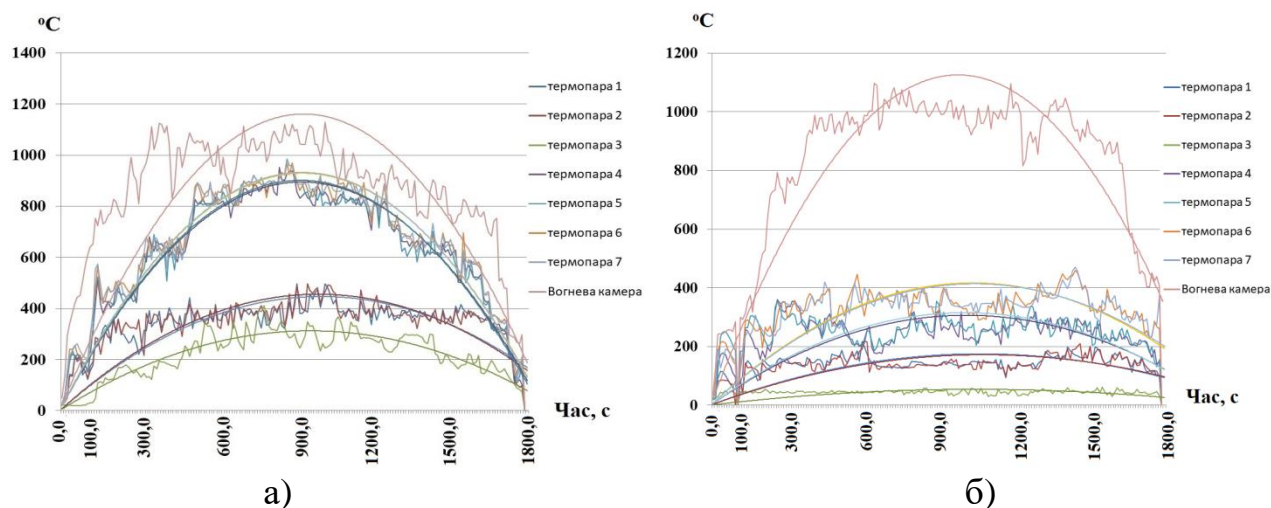


Рисунок 8 – Динаміка зміни температури на поверхні фасаду для сценаріїв:
 в) фасад під кутом $+20^\circ$ відносно вертикалі; г) фасад під кутом -20° відносно вертикалі

Результати випробувань показали, що для термопар Т1-Т3, які розташовуються на рівні віконного прорізу у фрагменті фасаду розміщеного під кутом 0° відносно вертикалі (тобто абсолютно вертикально) значення температури за поліноміальними кривими в момент пікових значень температурного режиму у вогневій камері (з 500 по 1500 секунди) для вогнища пожежі класу В з пожежною навантагою 2290 МДж/м^2 становить в межах $375\text{-}400 \text{ }^\circ\text{C}$. В цей же час, для тих самих термопар, які розташовуються у фрагменті фасаду розміщеного під кутом нахилу $+20^\circ$ відносно вертикалі значення температури за поліноміальними кривими в момент пікових значень температурного режиму у вогневій камері складає в межах $550\text{-}600 \text{ }^\circ\text{C}$. Для фрагменту фасаду розміщеного під кутом нахилу -20° відносно вертикалі значення температури для термопар Т1-Т3 за поліноміальними кривими в момент пікових значень температурного режиму у вогневій камері складає в межах $180\text{-}210 \text{ }^\circ\text{C}$. Отримані дані дозволяють зробити попередній висновок, що нахил досліджуваного фрагменту фасадної системи значно впливає на процеси поширення пожежі, а саме, зміна температури на поверхні фасаду в залежності від кута нахилу чи схилу може змінюватися фактично 1,6-2,4 рази, як в сторону збільшення так і зменшення.

Наступним етапом експериментальних випробувань стало дослідження процесів обмеження поширення пожежі по зовнішнім огорожувальним конструкціям за допомогою пасивних, комбінованих та активних фасадних протипожежних перешкод. В якості фасадної протипожежної перешкоди пасивного типу використано протипожежний карниз шириною 0,3 м. В якості фасадної протипожежної перешкоди комбінованого типу використано протипожежний карниз шириною 0,3 м та дренчерний зрошувач із направляючою лопаткою, що забезпечує розрахункову інтенсивність зрошення 5 мм/хв ($0,083 \text{ л/с}\cdot\text{м}^2$) при тиску 0,2 МПа. для подавального трубопроводу діаметром 25 мм. В табл. 2 наведено серії відповідних натурних вогневих досліджень.

Таблиця 2 – Серії експериментальних досліджень при застосуванні фасадних протипожежних перешкод

5 серія досліджень			
		Розміщенням досліджуваного фрагменту фасадної системи вертикально. Фасад обладнано протипожежним карнизом шириною 0,3 м	
6 серія досліджень			
			Розміщенням досліджуваного фрагменту фасадної системи вертикально. Фасад обладнано протипожежним карнизом шириною 0,3 м та дренчерним зрошувачем

За результатом даного етапу експериментальних досліджень побудовано залежності щодо зміни температури на поверхні дослідних зразків фасадів від тривалості температурного впливу пожежі, результати яких представлені на рис. 9.

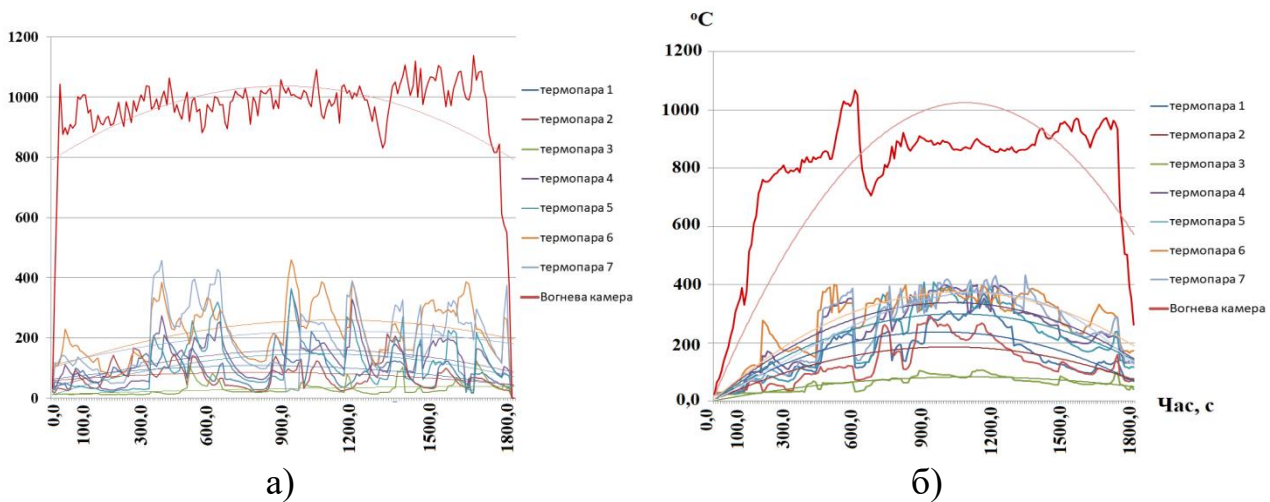


Рисунок 9 – Динаміка зміни температури на поверхні фасаду для сценаріїв: а) фасад розміщено вертикально та обладнано протипожежним карнизом; б) фасад розміщено вертикально та обладнано протипожежним карнизом із дренчерним зрошувачем

Аналіз отриманих даних показав, що значення температури за поліноміальними кривими в момент пікових значень температурного режиму у вогневій камері (з 500 по 1500 секунди) для даних термопар становить в межах 375-400 °С при відсутності протипожежного карнизу. За наявності протипожежного карнизу шириною 0,3 м для термопар Т1-Т3 значення

температури за поліноміальними кривими в момент пікових значень температурного режиму у вогневій камері становить в межах 210-240 °С за результатом серії досліджень із 3-х експериментів. За наявності протипожежного карнизу шириною 0,3 м та дренчерного зрошувача із інтенсивністю зрошення 0,083 л/с·м² для термопар Т1-Т3 значення температури за поліноміальними кривими в момент пікових значень температурного режиму у вогневій камері становить в межах 140-160 °С за результатом серії досліджень із 3-х експериментів. Тобто за даних умов, протипожежний карниз пасивного чи комбінованого типу шириною 0,3 м дозволив зменшити значення середнього температурного впливу фактично від 2,2 до 3,1 разів.

Отримані дані за кожним окремим експериментом оцінені, використовуючи абсолютні, відносні та середньоквадратичні відхилення, а також статистичні критерії Грабса та Фішера. Критерій Грабса (G_j) використано для визначення наявності в отриманих експериментальних даних викидів та квазівикидів за рівнянням:

$$G_{jmax} = \frac{|\bar{y}_j - y_j|}{S_j}, \quad (10)$$

де y_j , \bar{y}_j і S_j - відповідно порядкове значення ряду, середнє значення та середньоквадратичне відхилення.

Експериментальні дані, які мали викиди або квазівикиди за критерієм Грабса, не враховували під час подальшого оброблення результатів. Приклад даних щодо оцінки наявності в експериментальних даних викидів та квазівикидів за критерієм Грабса для дослідних ділянок фасаду на рівні 1400 мм від верхнього краю вогневої камери, які розміщено під кутами -20°; 0° та +20°, наведені на рис. 10.

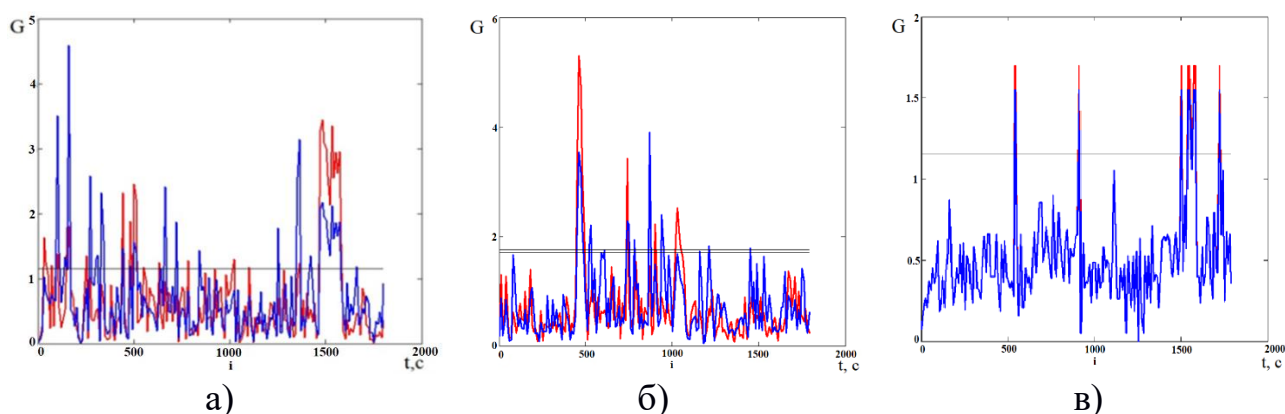


Рисунок 10 - Дані щодо оцінки наявності в експериментальних даних викидів та квазівикидів за критерієм Грабса для сценаріїв: а) вертикально розміщений фасад; б) фасад розміщено під кутом -20° відносно вертикалі; в) фасад розміщено під кутом +20° відносно вертикалі

Застосоване вогнище пожежі класу В із використанням дека модельного вогнища пожежі класу 34В з пожежною навантагою до 2290 МДж/м² забезпечило

умови сталого температурного режиму та вогневого впливу на досліджуваний фрагмент фасаду. Серед недоліків, доцільно відмітити фазу кінцевого вигорання палива (1700-1800 секунди) при якій спостерігався досить нестабільний вогневий режим, що спостерігається на графіках дисперсії відхилень для термопар. З метою перевірки збіжності серій експериментів, обчислено дисперсії відхилень по середнім значенням відповідних термопар, що порівнювалися за формулою 11.

$$\sigma = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}_i|^2}{n}, \quad (11)$$

де x_i – значення i -го дослідження; \bar{x}_i - середнє значення; n – кількість досліджень.

Приклад дисперсійних відхилень по середнім значенням для дослідних зразків фасадів на рівні 1400 мм від верхнього краю вогневої камери, які розміщено під кутами -20° ; 0° та $+20^\circ$, наведені на рис. 11.

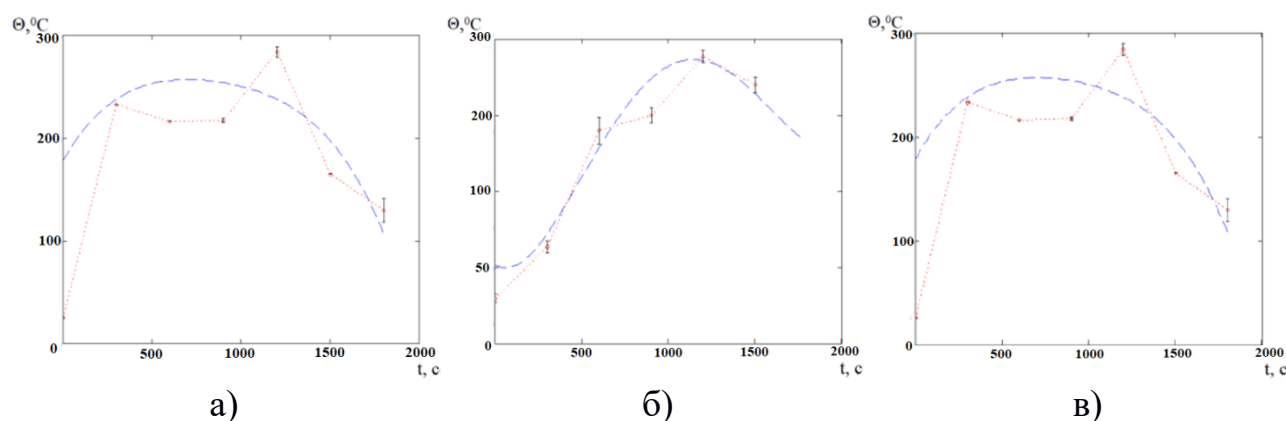


Рисунок 11 - Дані щодо дисперсії відхилень по середнім значенням для сценаріїв: а) вертикально розміщений фасад; б) фасад розміщено під кутом -20° відносно вертикалі; в) фасад розміщено під кутом $+20^\circ$ відносно вертикалі

За результатом проведення оцінки розбіжності за кожною із серій проведених експериментальних досліджень визначено абсолютні, відносні та середньоквадратичні відхилення усереднених експериментальних досліджень а також належність дисперсій до однієї генеральної сукупності результатів. В таблиці 3 наведено узагальнені дані адекватності для термопар, які розміщені в зоні нижнього краю вікна, яке розташоване над вогневою камерою, що імітує поверхні пожежі за кожною із серій випробування під час дослідження закономірностей поширення пожежі по зовнішнім огорожувальним конструкціям в залежності від їх конструктивних параметрів. В табл. 3 приведено узагальнені результати перевірки відхилень експериментальних випробувань як передумова підтвердження самої гіпотези дослідження.

Таблиця 3 - Узагальнені результати перевірки адекватності проведених досліджень щодо виявлення закономірностей поширення пожежі по зовнішнім огорожувальним конструкціям

Номер серії випробування	Абсолютне відхилення, °C	Відносне відхилення, %	Середнє квадратичне відхилення, °C	Критерій Фішера 5%* - 6,39
1 серія випробувань	15,4	6,6	20,6	1,37
2 серія випробувань	7,9	2,9	8,9	1,21
3 серія випробувань	7,4	1,8	8,8	1,38
4 серія випробувань	9,4	7,4	12,0	1,45
5 серія випробувань	8,6	5,7	10,91	0,81
6 серія випробувань	11,2	9,8	13,18	1,05
Діапазон відхилень	7,4÷15,4	1,8÷9,8	8,8÷20,6	0,81÷1,45
Середні значення	10,0	5,7	12,4	1,22

Таким чином, абсолютні відхилення між усередненими експериментальними дослідженнями та кожною із серій експериментальних досліджень не перевищують 15,4 °C, що відсоткових показниках не перевищує 9,8 %, середньоквадратичні відхилення становлять в межах 8,8÷20,6 °C, що вказує на те, що дані кожного експериментального дослідження максимально наближені до усереднених даних експерименту, що підтверджує загальну збіжність кожного окремого експериментального дослідження.

У шостому розділі «Розроблення комп'ютерної газо-гідродинамічної моделі та оцінка її адекватності» наведено результати досліджень щодо розроблення газо-гідродинамічної моделі, що відтворює умови натурних випробувань згідно з розробленою

Програмою експериментальних досліджень запобігання поширення пожежі по зовнішнім огорожувальним конструкціям. Створення такої моделі дозволило забезпечити комплексність підходів щодо можливості прогнозування поширення пожежі по зовнішнім огорожувальним конструкціям будівель, а також забезпечення можливості оптимізації процесу оцінювання ефективності заходів щодо її обмеження.

На першому етапі створення газо-гідродинамічної комп'ютерної моделі забезпечено відтворення конструктивних та масштабних параметрів конструкції Установки для прогнозування поширення пожежі по зовнішнім вертикальним огорожувальним конструкціям будівель та вихідних умов, що визначені Програмою досліджень. На рис. 12 наведено візуалізацію відтвореної Установки та зовнішній вигляд створеної її FDS моделі.

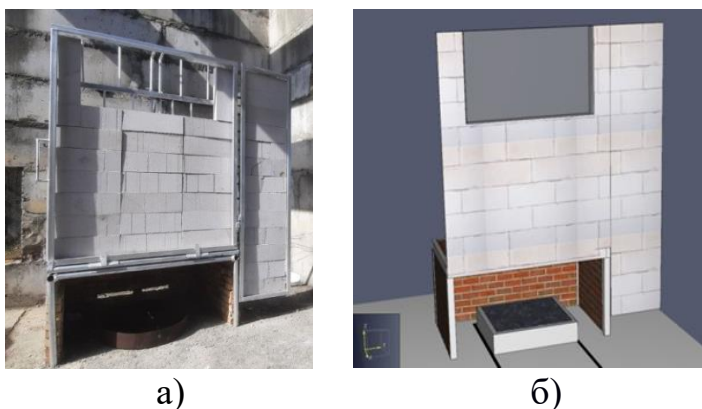


Рисунок 12 – Порівняльна візуалізація установки прогнозування поширення пожежі по зовнішнім вертикальним огорожувальним конструкціям: а) фото Установки; б) візуалізація її FDS моделі.

Для забезпечення виконання розрахункових операцій визначалася зона створення розрахункової сітки моделі в межах якої виконувалися обчислення моделі тепломасопереносу та створено відповідний чисельний алгоритм для моделювання цього процесу з врахуванням зміни конструктивних параметрів фрагменту фасаду. Значення розмірів комірок розрахункової сітки для моделювання натурних досліджень прийнято 10 см × 10 см, тобто всього 39 000 розрахункових комірок. Для забезпечення отримання температурних розподілів на поверхні досліджуваного фрагменту фасаду у відповідних зонах на його поверхні розміщено вимірювачі температури у газовій фазі згідно із схемою наведеною у Програмі досліджень.

На рис. 13 наведено створену газо-гідродинамічну модель та місця розміщення датчиків для виміру температури на поверхні фрагменту фасаду.

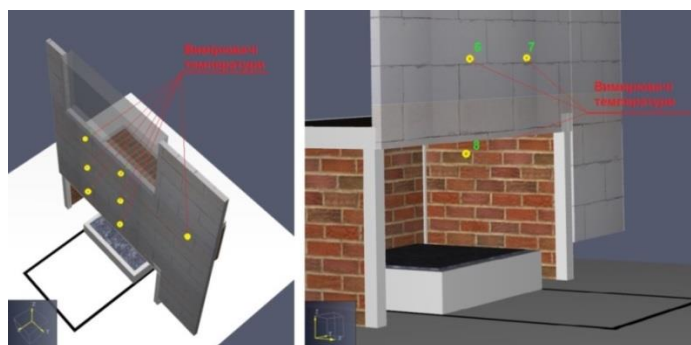


Рисунок 13 – Місця встановлення вимірювачів температури на поверхні досліджуваного фрагменту фасаду та у вогневій камері

Під час створення моделі металевого дека вогнища пожежі класу В з пожежною навантагою 2290 МДж/м² для забезпечення необхідного температурного режиму у вогневій камері та відповідного температурного впливу на досліджуваний фрагмент фасаду здійснено верифікацію створеної моделі вогнища пожежі із його натурною моделлю. Слід зазначити, що для забезпечення нормальних розрахункових процесів програми FDS, комірки сітки повинні мати правильну, рівнопропорційну кубічну форму. Враховуючи те, що

деко має круглу форму загальною площею $1,07 \text{ м}^2$ (діаметр $1170 \pm 10 \text{ мм}$), для забезпечення належного розрахункового процесу прийнято рішення відтворити модель вогнища пожежі у прямокутній формі з висотою борту дека $230 \pm 5 \text{ мм}$ та із аналогічною площею горіння. На рис. 14 наведено візуалізацію процесу оцінки адекватності створеного модельного вогнища пожежі на основі результатів натурних імітаційних досліджень.

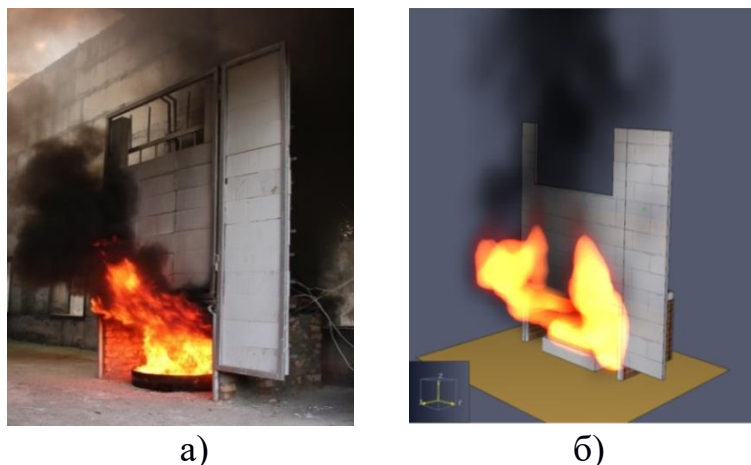


Рисунок. 14 - Порівняльна візуалізація роботи установки для прогнозування поширення пожежі під час оцінювання адекватності створеного модельного вогнища: а) натурні дослідження; б) імітаційна FDS модель

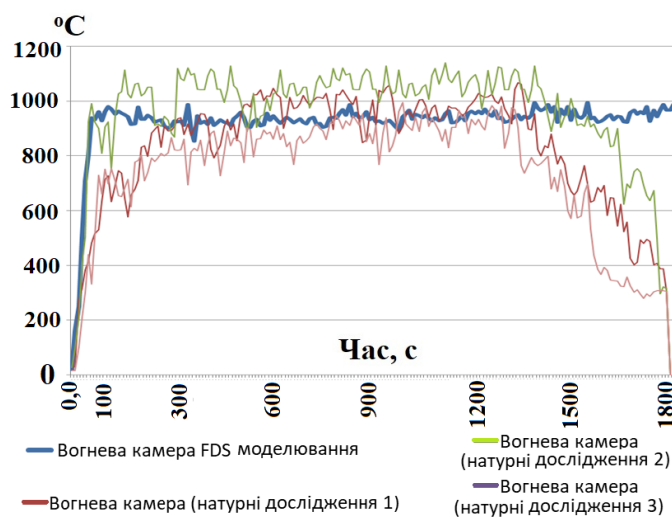


Рисунок 15 - Порівняння результатів експериментальних даних (зелена, червона та пурпурна крива) та отриманих результатів створеної газо-гідродинамічної моделі щодо температурного режиму у вогневій камері (синя крива)

моделі вогнища пожежі класу В та відповідно температурного режиму у вогневій камері можна вважати достатньою.

За результатом проведеної серії натурних експериментальних досліджень (трьох випробувань) отримано графіки температурного режиму у вогневій камері та порівняно результати із даними створеної газо-гідродинамічної моделі Установки. За результатом аналізу побудовано графіки температурних кривих, які наведено на рис. 15.

Статистика проведених досліджень свідчить, що абсолютні відхилення усереднених експериментальних досліджень не перевищують $105,6 \text{ }^\circ\text{C}$, що у відсоткових показниках не перевищує $12,7 \%$, середньо-квадратичні відхилення становлять $85,1 \text{ }^\circ\text{C}$, що вказує на те, що дані точок кожного експериментального дослідження скупчені ближче до середнього значення (математичного сподівання) вибірки. Таким чином, збіжність створеної газо-гідродинамічної

Наступним етапом верифікації розробленої газо-гідродинамічної моделі Установки для прогнозування поширення пожежі по зовнішнім огорожувальним конструкціям будівель є дослідження та порівняння температурних розподілів на поверхні досліджуваного фрагменту фасаду попередньо отриманих в результаті натурних експериментальних досліджень та температурних розподілів отриманих на основі створеної комп'ютерної моделі за аналогічних умов досліджень.

За результатом проведених розрахункових дій та експериментальних досліджень, та з метою визначення збіжності результатів для FDS моделі та створеної Установки, побудовані графіки порівнянь для кожної термопари розміщеної на поверхні досліджуваного фрагменту фасаду. Приклад результатів порівнянь для термопари розміщеної в зоні світлового прорізу поверху, який розташований над поверхом де імітується пожежа наведено на рис. 16.

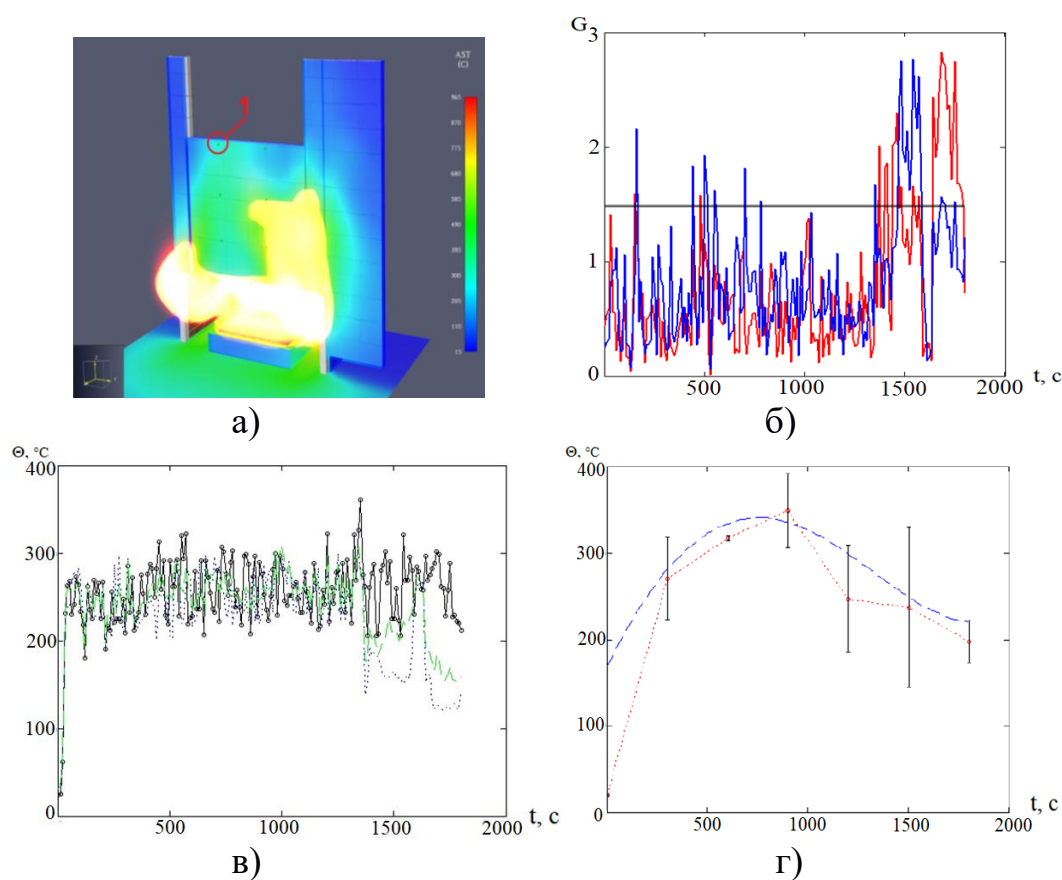


Рисунок 16 - Обробка результатів експериментальних досліджень за методами математичної статистики: а) FDS модель Установки із зазначенням досліджуваної зони фасаду б) дані щодо оцінки викидів та квазिवикидів за критерієм Грабса; в) криві значення температури в залежності від тривалості досліджень; г) дані щодо дисперсії відхилень по середнім значенням

За результатом проведених обчислень встановлено, що абсолютні відхилення між результатами математичного моделювання та усередненими експериментальними дослідженнями не перевищують $38,1\text{ }^\circ\text{C}$, що відсоткових показниках не перевищує $11,7\%$, середньоквадратичні відхилення становлять в межах $23\div 48\text{ }^\circ\text{C}$, що вказує на те, що дані комп'ютерного моделювання

максимально наближені до усереднених даних експерименту, що підтверджує загальну збіжність створеної газогідродинамічної моделі та кожного окремого експериментального дослідження. Це означає, що комп'ютерне моделювання процесу поширення пожежі по зовнішній огорожувальній конструкції дає досить точні результати і може бути використане для дослідження зв'язків параметрів поширення пожежі по зовнішніми огорожувальними конструкціями та створення табличних методів оцінювання даних процесів.

На основі обґрунтованих критеріїв, які характеризують небезпеку поширення пожежі вертикальними будівельними конструкціями та параметрів які враховують їх конструктивні та інженерні особливості превентивних заходів на основі розробленої FDS моделі проведено дослідження впливу параметрів зовнішніх огорожувальних конструкцій будівель на процеси зміни температур на їх поверхні. На рис. 17 наведено приклади основних моделей на основі яких було отримано дані щодо характеру температурних розподілів.

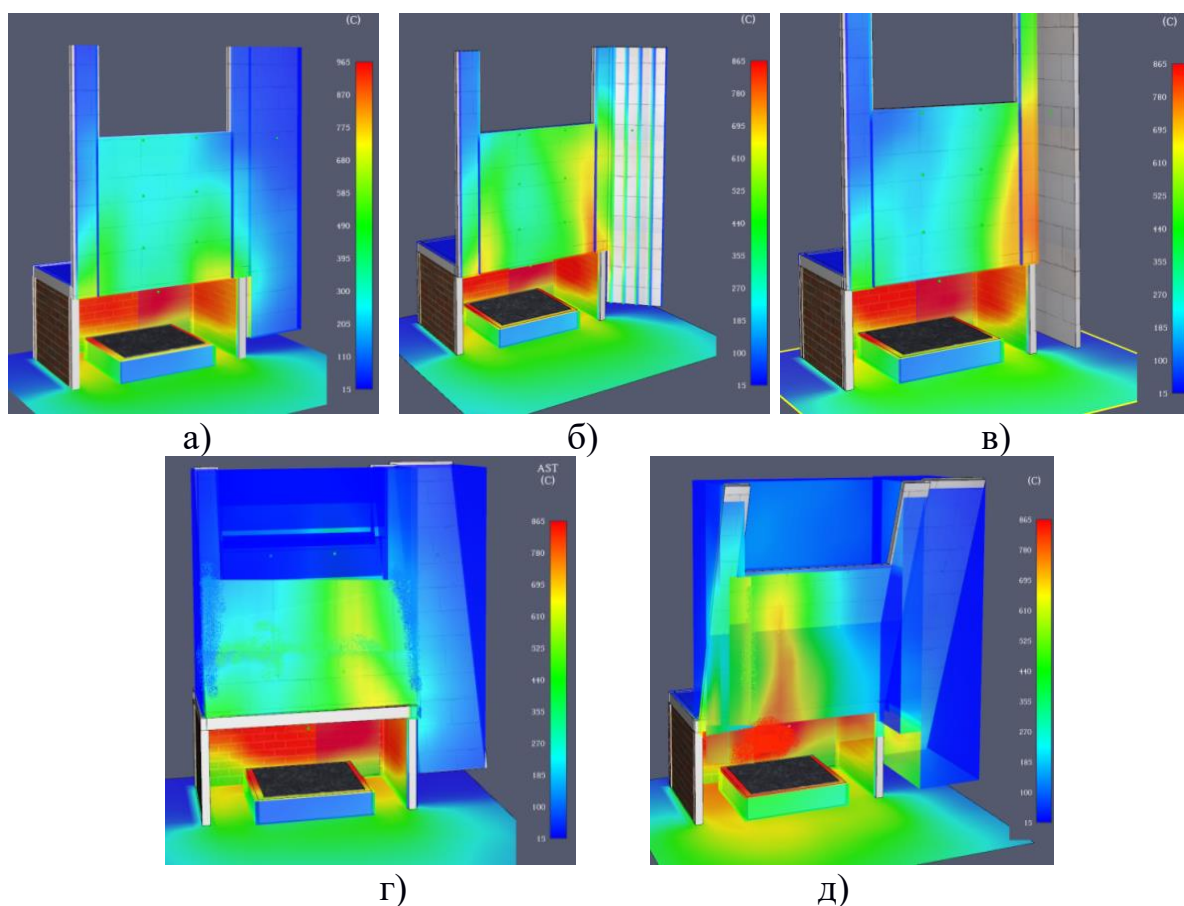


Рисунок 17 – Нагрів при пожежі поверхні фасадів розташованих: а) вертикальне розміщення фасаду; б) фасад із прилеглою площиною під кутом 45° ; в) фасад із прилеглою площиною під кутом 90° ; г) фасад під кутом -20° ; д) фасад під кутом $+20^\circ$

Також, досліджено закономірності умов обмеження поширення пожежі під час оцінювання ефективності фасадних протипожежних перешкод різного типу, а саме досліджено протипожежні карнизи шириною від 0,3 м до 1,5 м із кроком збільшення ширини карнизу 0,1 м. При цьому розглянуто варіант застосування

фасадної протипожежної перешкоди активного типу, а саме протипожежного карнизу із дренчерним зрошувачем, який забезпечує розрахункову інтенсивність зрошення 5 мм/хв ($0,083 \text{ л/с}\cdot\text{м}^2$). На рис. 18 наведено порівняння отриманих результатів щодо характеру температурних розподілів при застосуванні протипожежного карнизу шириною 0,3 м та аналогічного карнизу з інтегрованою системою дренчерного зрошування.

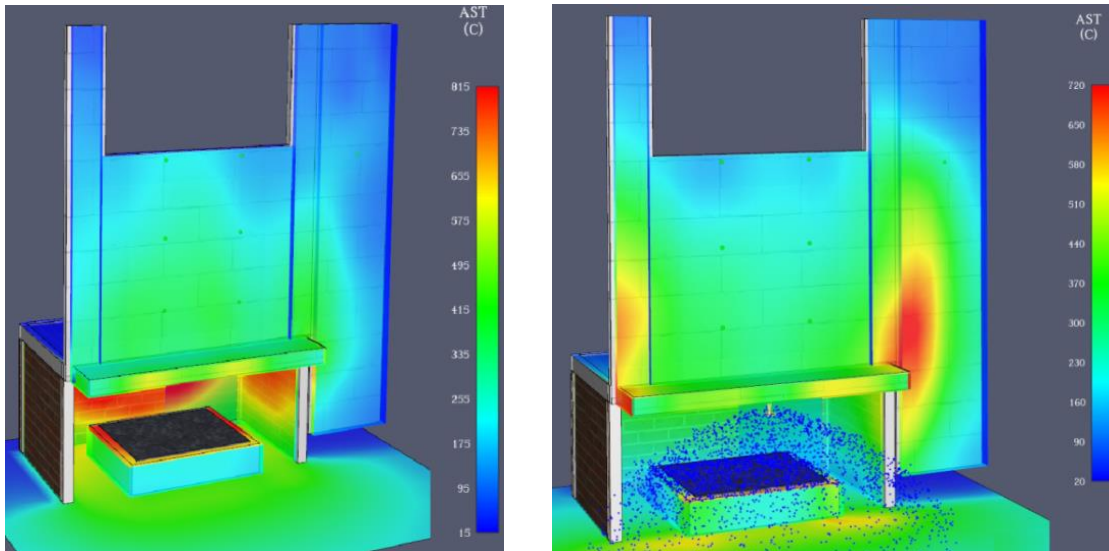


Рисунок 18 – Візуалізація теплових розподілів по вертикальним огорожувальним конструкціям: а) температурні розподіли на фасаді, який обладнаний протипожежним карнизом шириною 0,3 м; б) температурні розподіли на фасаді, який обладнаний протипожежним карнизом шириною 0,3 м та дренчерним зрошувачем 5 мм/хв ($0,083 \text{ л/с}\cdot\text{м}^2$)

Встановлено, що у продовж 30 хвилинного впливу вогнища пожежі класу В з пожежною навантагою 2290 МДж/м^2 на фрагмент вертикально встановленого фасаду обладнаного протипожежним карнизом шириною від 0,3 м до 1,5 м значення температури на поверхні зовнішньої огорожувальної конструкції вище розташованого поверху знижується на 8-15% для кожного кроку збільшення в 0,1 м ширини протипожежного карнизу. При цьому, при ширині протипожежного карнизу більше 1,5 м його ефективність фактично не змінюється, а тому подальше його збільшення є недоцільним.

На основі отриманих даних, здійснено систематизацію взаємозв'язків та закономірностей впливу параметрів зовнішніх огорожувальних конструкцій будівель на процеси зміни температури на їх поверхні.

На рис. 19 наведено залежність зміни значення температурних розподілів на різних рівнях висоти фасаду від зміни значення кута прилягання суміжної площини фасаду.

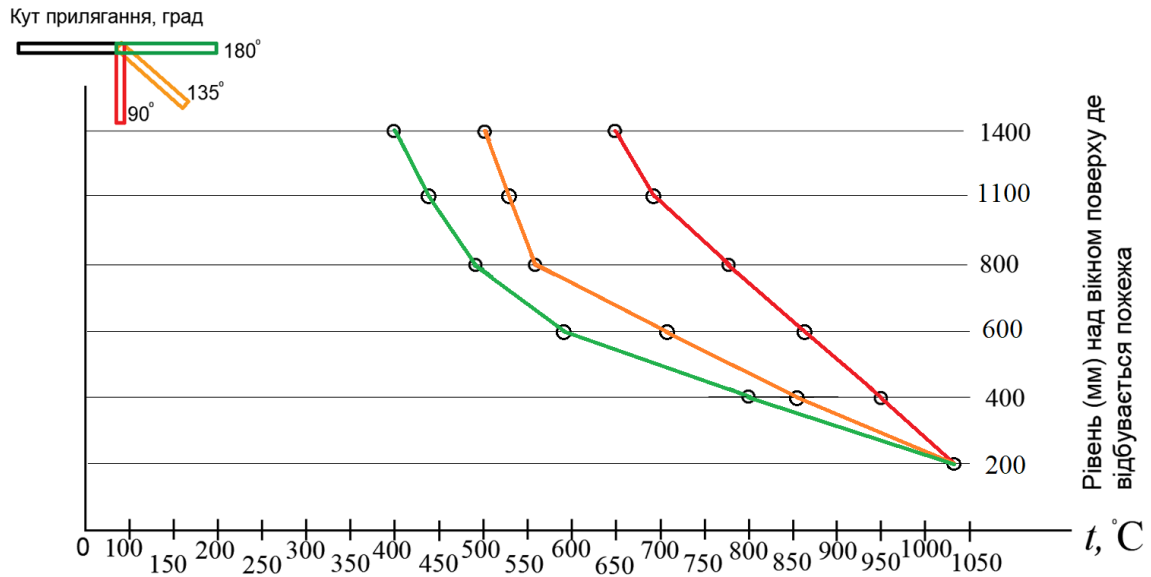


Рисунок 19 – Візуалізація залежності зміни значення температури на поверхні фасаду при визначених кутах прилягання суміжної площини фасаду де колір кривої відповідає кольору кута прилягання суміжного фасаду

Систематизовано залежність змін значень температури на поверхні фасаду для визначених кутів нахилу площини фасаду (від -20° до $+20^\circ$), що наведено на рис. 20.

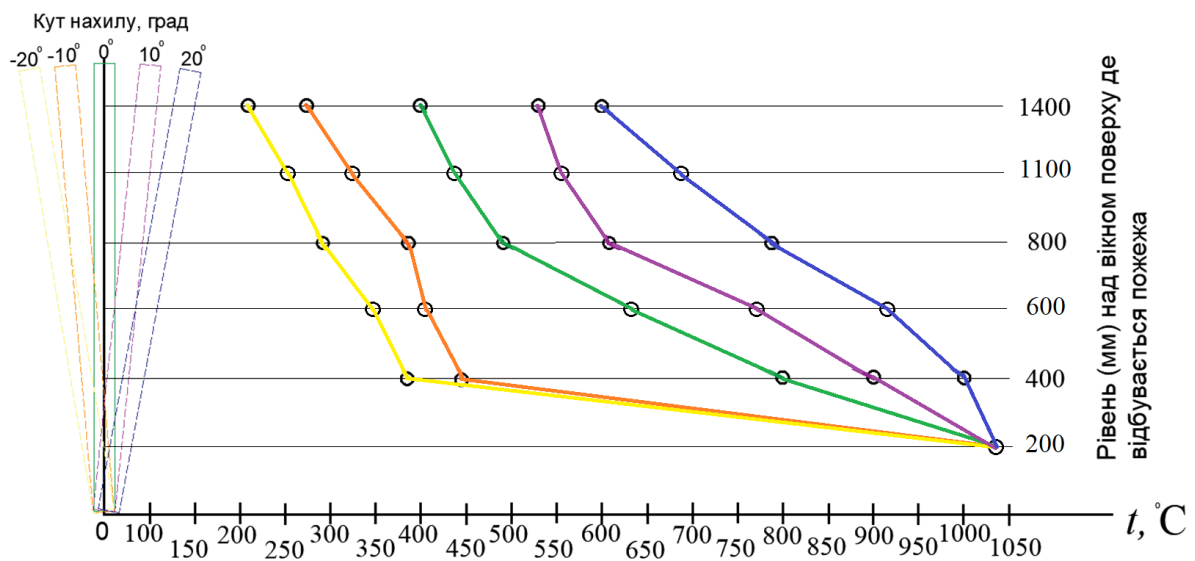


Рисунок 20 – Візуалізація залежності зміни значення температури на поверхні фасаду при визначених кутах його нахилу де колір кривої відповідає кольору нахилу фасаду

Визначено та систематизовано залежності змін значень температури на поверхні фасаду при застосуванні фасадних протипожежних перешкод, а саме протипожежного карнизу шириною 0,3; 0,75 та 1,5 м, та аналогічних карнизів обладнаних дренчерним зрошувачем який забезпечує розрахункову інтенсивність зрошення 5 мм/хв ($0,083 \text{ л/с}\cdot\text{м}^2$), що наведено на рис. 21.

запобігання поширення пожежі зовнішніми огорожувальними конструкціями будівель з негорючим облицюванням та реалізувати параметричний метод нормування вимог пожежної безпеки до будівель.

Для створення методу розрахункової оцінки можливості запобігання поширення пожежі по фасадам будівель побудовано універсальну математичну модель на основі регресійної залежності. Для цього складено план повно-факторного обчислюваного експерименту із врахуванням найбільш значущих конструктивних параметрів фасаду, що впливають на процеси теплопередачі. До таких факторів віднесено ширину протипожежного карнизу (R), висоту міжповерхових віконних простінків (h), наявність прилеглої частини фасаду під кутом 180° або 90° та наявність або відсутність дренчерного зрошувача. Враховуючи гіпотезу лінійної залежності, її математичну модель можливо побудувати на основі регресії:

$$H = h_0 + h_1x_1 + h_2x_2 + h_3x_3 + h_4x_1x_2 + h_5x_1x_3 + h_6x_2x_3 + h_7x_1x_2x_3, \quad (12)$$

де $h_0, h_1, h_2, h_3, h_4, h_5, h_6, h_7$ – константи рівняння числової регресії; x_1, x_2, x_3 – параметри, що враховують вибрані фактори та інтервали їх параметрів, які зазначені у таблиці 7.1;

Коефіцієнти регресії (12) обчислено на основі 8 числових експериментів. Числові експерименти проводять за простим ортогональним планом, що у відповідності із матрицею плану, яка подана нижче у вигляді табл. 4.

Таблиця 4 - Матриця планування повного факторного експерименту для побудування математичної моделі

Номер експерименту	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$
1	+	+	+	+	+	+	+
2	-	+	+	-	-	+	-
3	+	-	+	-	+	-	-
4	-	-	+	+	-	-	+
5	+	+	-	+	-	-	-
6	-	+	-	-	+	-	+
7	+	-	-	-	-	+	+
8	-	-	-	+	+	+	-

У табл. 5 представлено границі інтервалів, у яких змінюються зазначені фактори під час числового повного факторного експерименту для побудови математичної моделі залежності дисперсії температур від описаних вище параметрів.

Таблиця 5 – Інтервали варіювання факторів у чисельному експерименті

Ширина протипожежного карнизу, м			Висота міжповерхових віконних простінків, м			Кут прилягання суміжної фасадної площини, град.	
Найменше значення	Середнє значення	Найбільше значення	Найменше значення	Середнє значення	Найбільше значення	Найменше значення	Найбільше значення
0,3	0,75	1,5	400	800	1400	180°	90°

На основі діапазонів варіювання факторів, що подані в табл. 5, із використанням матриці плану повного факторного експерименту за табл. 4, проведено розрахункові дії та отримано значення дисперсій температур на поверхні зовнішньої огорожувальної конструкції для критичних відстаней міжповерхового віконного простінку для всіх варіантів найбільш значущих параметрів. В якості критерію поширення пожежі на вище розташовані поверхи будівлі є температура руйнування конструкції заповнення світлових прорізів, а саме $t_{кр} = 250$ °С. Результати обчислень систематизовано в табл. 6.

Таблиця 6 - Значення висоти міжповерхових віконних простінків в умовах повного факторного експерименту згідно із прийнятою матрицею планування для негорючого фасаду будинку

Номер експерименту	1	2	3	4	5	6	7	8
Значення висоти міжповерхових віконних простінків, м	0,321	0,388	0,280	0,355	0,400	1,200	1,500	0,971

За результатом обрахунку числових величин табл. 5 та 6 визначено коефіцієнти регресії (12). Отримані дані щодо визначених коефіцієнтів регресії подано в табл. 7.

Таблиця 7 - Константи рівняння числової регресії для випадку негорючого фасаду

Коефіцієнт	h_0	h_1	h_2	h_3	h_4	h_5	h_6	h_7
Значення	679,0	-51,6	-99,6	-340,9	-165,1	16,1	118,1	167,1

Отримані дані дозволяють провести визначення мінімально необхідних значень міжповерхових віконних простінків для забезпечення умови не поширення пожежі від одного поверху на вище розташований.

Для можливості проведення комплексного прогнозування запобігання поширення пожежі зовнішніми огорожувальними конструкціями та оцінювання ефективності систем із перешкоджання поширення вогню визначено наступні чинники, які впливають на взаємозв'язки даних процесів:

- конструктивні параметри міжповерхових віконних простінків;
- коефіцієнт прорізів у зовнішніх огорожувальних конструкціях;
- величина пожежного навантаження;
- кути нахилу фасаду;
- кути прилягання суміжного фасаду;
- тривалість опромінення вище розташованого поверху;
- наявність фасадних протипожежних перешкод.

На рис. 22 наведено принципову схему впливу чинників на процеси поширення пожежі по зовнішнім огорожувальним конструкціям будівлі або запобігання її поширення.



Рисунок 22 – Принципова схема взаємозв'язків чинників, які впливають на процеси поширення фасадних пожеж

На основі отриманих залежностей обґрунтовано значення введених емпіричних коефіцієнтів α (кут прилягання суміжної площини фасаду) чи β (кут нахилу фасаду), які дозволяють враховувати вплив параметрів зовнішніх огорожувальних конструкцій на процеси зміни температури біля поверхні вище розташованої зовнішньої огорожувальної конструкції.

$$T_z = (T_w - T_0) \times [1 - 0,4725(L_f \cdot w_v / Q)] \times (\alpha \text{ чи } \beta) + T_0, \quad (12)$$

де: T_w – максимальне значення температури полум'я на рівні верхнього краю вікна поверху пожежі, К; T_0 – температура навколишнього середовища, К; L_f – відстань вздовж осі від верхнього вікна до точки, для якої робиться розрахунок, м;

W_t – ширина вікна приміщення, де відбулася пожежа, м; Q – питома теплота згоряння, Дж/кг; α чи β – коефіцієнт, який враховує конструктивну особливість фасаду $L_f \cdot w_v / Q < 1$;

Отримані результати дозволили забезпечити реалізацію застосування спрощеного методу розрахунку температури полум'я вздовж висоти фасаду із застосуванням отриманих емпіричних коефіцієнтів, які враховують конструктивне виконання фасадної системи. Отримані дані для коефіцієнтів « α » (кут прилягання суміжної площини) та « β » (кут нахилу фасаду) наведено в табл. 8.

Таблиця 8 - Емпіричні коефіцієнти, що враховують вплив параметрів зовнішніх огорожувальних конструкцій на зміну температури на їх поверхні

Тип конструктивного виконання фрагменту фасадної системи	Наявність протипожежного карнизу з шириною, м (чисельник)/із зрошенням 0,083 л/с·м ² захищеної площі фасаду (знаменник)			
	Без протипожежного карнизу	0,3	0,75	1,5
Кут прилягання суміжного фасаду				
Коефіцієнт « α -180»	<u>1,15</u> 0,55	<u>0,72</u> 0,45	<u>0,55</u> 0,35	<u>0,32</u> 0,2
Коефіцієнт « α -145»	<u>1,2</u> 0,64	<u>0,77</u> 0,5	<u>0,6</u> 0,4	<u>0,45</u> 0,3
Коефіцієнт « α -90»	<u>1,35</u> 0,7	<u>0,85</u> 0,65	<u>0,65</u> 0,45	<u>0,47</u> 0,35
Кут нахилу фасаду відносно вертикалі				
Коефіцієнт « β +20»	<u>1,35</u> 1,05	<u>1,15</u> 0,75	<u>1,00</u> 0,35	<u>0,32</u> 0,2
Коефіцієнт « β +10»	<u>1,25</u> 1,0	<u>1,1</u> 0,65	<u>0,95</u> 0,45	<u>0,75</u> 0,38
Коефіцієнт « β -10»	<u>1,0</u> 0,85	<u>0,45</u> 0,3	<u>0,3</u> 0,26	<u>0,22</u> 0,2
Коефіцієнт « β -20»	<u>0,82</u> 0,55	<u>0,45</u> 0,27	<u>0,3</u> 0,22	<u>0,22</u> 0,18

Для реалізації табличного методу розрахунку температури полум'я вздовж висоти фасаду на основі результатів експериментальних досліджень, а також досліджень на основі газогідродинамічної комп'ютерної моделі, створено довідкову таблицю в якій визначено орієнтовні максимальні значення температур на зовнішній огорожувальній конструкції, що утворюються в результаті впливу пожежі в залежності від її конструктивного виконання. Приведені температури мають додаткові кореляційні значення, які враховують наявність протипожежних карнизів шириною 0,3 м; 0,75 м та 1,5 м, в тому числі із інтегрованою системою дренчерного зрошення. Отримані дані систематизовано та наведено в табл. 9.

Таблиця 9 – значення температури біля поверхні вище розташованого фасаду від дії пожежі з врахуванням його конструктивних параметрів

Тип розміщення фрагменту фасадної системи	Без протипожежного карнизу	Наявність протипожежного карнизу з шириною, м (чисельник) /дренчерний зрошувач з інтенсивністю зрошенням 0,083 л/с·м ² фасаду (знаменник)			Відстань від верхнього краю віконного прорізу поверху пожежі до вище розташованого вікна, мм
		0,3	0,75	1,5	
Діапазон пікових значень температури біля поверхні фасаду, °С					
Під кутом 0°, відносно вертикалі. Прилегла частина фасаду розміщена під кутом 180° відносно основної площини	1030	<u>1100</u> 600	<u>1200</u> 600	<u>1200</u> 600	0
	800	<u>420</u> 260	<u>170</u> 140	<u>100</u> 130	400
	480	<u>270</u> 230	<u>140</u> 120	<u>130</u> 110	800
	400	<u>240</u> 160	<u>130</u> 110	<u>120</u> 100	1400
Під кутом 0°, відносно вертикалі. Прилегла частина фасаду розміщена під кутом 145° відносно основної площини	1100	<u>1100</u> 600	<u>1200</u> 600	<u>1200</u> 600	0
	850	<u>530</u> 290	<u>190</u> 160	<u>100</u> 130	400
	560	<u>300</u> 240	<u>160</u> 110	<u>130</u> 120	800
	500	<u>280</u> 180	<u>160</u> 110	<u>120</u> 110	1400
Під кутом 0°, відносно вертикалі. Прилегла частина фасаду розміщена під кутом 90° відносно основної площини	1150	<u>1150</u> 600	<u>1200</u> 600	<u>1200</u> 600	0
	950	<u>700</u> 330	<u>380</u> 230	<u>220</u> 170	400
	780	<u>400</u> 270	<u>240</u> 160	<u>200</u> 130	800
	650	<u>300</u> 200	<u>220</u> 130	<u>180</u> 110	1400
Під кутом +20°, відносно вертикалі. Прилегла частина фасаду розміщена під кутом 180° відносно основної площини	1150	<u>1100</u> 600	<u>1200</u> 600	<u>1200</u> 600	0
	1000	<u>970</u> 460	<u>770</u> 360	<u>380</u> 360	400
	780	<u>750</u> 380	<u>580</u> 350	<u>460</u> 350	800
	600	<u>700</u> 350	<u>470</u> 280	<u>380</u> 280	1400
Під кутом +10°, відносно вертикалі. Прилегла частина фасаду розміщена під кутом 180° відносно основної площини	1070	<u>1100</u> 600	<u>1200</u> 600	<u>1200</u> 600	0
	900	<u>870</u> 460	<u>540</u> 350	<u>380</u> 360	400
	610	<u>680</u> 380	<u>480</u> 300	<u>460</u> 350	800
	530	<u>620</u> 350	<u>360</u> 250	<u>380</u> 280	1400
Під кутом -10°, відносно вертикалі. Прилегла частина фасаду розміщена під кутом 180° відносно основної площини	1030	<u>1100</u> 600	<u>1200</u> 600	<u>1200</u> 600	0
	440	<u>350</u> 230	<u>140</u> 140	<u>90</u> 90	400
	380	<u>250</u> 200	<u>110</u> 120	<u>70</u> 80	800
	270	<u>180</u> 130	<u>90</u> 110	<u>70</u> 60	1400

Продовження таблиці 5

Під кутом -20° , відносно вертикалі. Прилегла частина фасаду розміщена під кутом 180° відносно основної площини	1030	<u>1100</u> 600	<u>1200</u> 600	<u>1200</u> 600	0
	380	<u>300</u> 180	<u>120</u> 140	<u>90</u> 80	400
	290	<u>200</u> 160	<u>110</u> 100	<u>60</u> 60	800
	210	<u>150</u> <u>110</u>	<u>80</u> <u>90</u>	<u>60</u> <u>50</u>	1400

Таким чином розроблено методичне забезпечення для розрахункового обґрунтування конструктивних параметрів безпеки зовнішніх огорожувальних конструкцій в частині забезпечення обмеження поширення по ним пожежі в основу якої покладено виконання умови безпеки, при якій розрахункова температура, яка утворюється біля нижнього краю вікна не повинна перевищувати 250°C для суцільних або комбінованих світлопрозорих фасадних систем та 350°C для будівель в конструкції зовнішніх огорожувальних конструкцій яких є міжповерхові віконні простінки на кожному поверсі. Умови безпеки можуть бути виконані як за рахунок зміни параметрів міжповерхових віконних простінків так і за допомогою застосування фасадних протипожежних перешкод, а саме протипожежних карнизів, протипожежних віконних карнизів та систем пожежогасіння або інших систем стримування поширення вогню.

Розроблений науково-методичний апарат, який є системою, що об'єднує створений метод натурних випробувань, спрощений метод розрахунку температури полум'я вздовж висоти фасаду, а також табличний метод визначення температури полум'я вздовж висоти фасаду, що спільно з обґрунтованими критеріями, які характеризують умови поширення пожежі по фасаді, дозволяє визначити умови запобігання поширення пожежі зовнішніми огорожувальними конструкціями будівель з негорючим облицюванням та реалізувати параметричний метод нормування вимог пожежної безпеки до будівель.

Результати досліджень стали теоретичною та практичною основою під час розроблення ДБН В.2.2-41:2019 «Висотні будівлі. Основні положення» та ДСТУ 9192:2022 «Пожежна безпека. Проектування висотних громадських будівель з умовною висотою від 100 м до 150 м». Також результати роботи реалізовані в ДСТУ 9222:2023 «Пожежна безпека. Протипожежний захист систем зарядки електромобілів. Основні положення» в частині обґрунтування параметрів безпеки під час влаштування зарядних станцій для електромобілів на фасадах будівель.

На прикладі реального об'єкту, а саме висотної громадської будівлі з умовною висотою 120 м (42 поверхи) проведено розрахунок економічного ефекту від впровадження запропонованого підходу щодо запобігання поширення пожежі зовнішніми огорожувальними конструкціями будівель, яким підтверджено його економічну ефективність. Зокрема, за результатом комп'ютерного моделювання фасадної пожежі встановлено, що при застосуванні розпорядчого методу нормування під час влаштування протипожежного карнизу площа критичного прогріву фасаду (вище 250°C) склала 48 м^2 . В цей же час, під час вибору типу протипожежного карнизу згідно запропонованого табличного методу оцінювання поширення пожежі зовнішніми огорожувальними конструкціями

будівель критичний прогрів фасаду не перевищив 17 m^2 . На рис. 22 наведено результати Візуалізація можливого поширення пожежі ззовні фасаду під час дослідження економічного ефекту та реалізації запропонованої методики розрахункової оцінки поширення пожежі зовнішніми огорожувальними конструкціями.

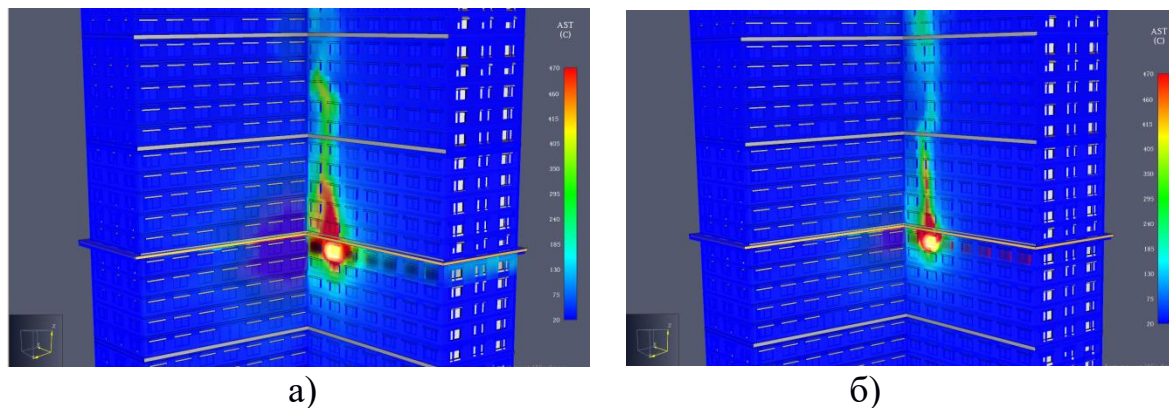


Рисунок 22 – Порівняння розрахункових меж поширення пожежі при застосуванні: а) розпорядчого методу нормування; б) розробленої розрахункової методики

За результатом оцінювання економічного ефекту, який можливо досягти при використанні розробленого науково-методичного апарата, що реалізує параметричний метод нормування у будівництві для розрахункової оцінки поширення пожежі зовнішніми огорожувальними конструкціями будівель, встановлено наступне. Для висотної будівлі, яка повинна бути обладнана фасадною протипожежною перешкодою, прогнозовану суму збитків від пожежі, яка поширюється фасадом будівлі, у відсотковому еквіваленті, можливо зменшити до 25% порівняно із застосуванням розпорядчого методу нормування у будівництві для будівлі з висотою міжповерхового віконного простінку 700 мм та при розділенні висотної будівлі на 2 вертикальних протипожежних відсіки порівняно із застосуванням наявного розпорядчого методу нормування.

ВИСНОВКИ

У дисертаційні роботі, яка є завершеним науковим дослідженням, наведено розв'язання актуальної науково-прикладної проблеми у сфері пожежної безпеки, що полягає у розкритті закономірностей впливу конструктивних параметрів зовнішніх огорожувальних конструкцій будівель на процеси зміни температур на їх поверхні під час пожежі, як підґрунтя для запобігання поширення пожежі по негорючим фасадам будівель, при цьому одержано такі наукові і практичні результати:

1. На основі аналізу вітчизняних та зарубіжних статистичних даних, теоретичних та експериментальних досліджень, а також нормативної бази щодо оцінки поширення пожежі по зовнішнім огорожувальним конструкціям будівлі обґрунтовано та систематизовано чинники, які можуть впливати на обмеження поширення пожежі по фасадам або бути причиною більш швидкого поширення

пожежі на вище розташовані поверхи будівлі. Доведено необхідність проведення комплексного прогнозування запобігання поширення пожежі ззовні будівлі на вище розташований поверх з прогнозуванням наслідків пожежі та врахуванням фактичних конструктивних параметрів фасаду.

2. Якісно удосконалено механізм та визначено критерії, які характеризують умови поширення пожежі у будівлі з негорючим фасадом, які відрізняються врахуванням величини температури руйнування світлопрозорих фасадних конструкцій та тривалості температурного впливу на них. Визначено найбільш несприятливі сценарії розвитку пожеж, при яких має місце явище поширення пожежі ззовні будівлі на вище розташовані поверхи, а також перелік найбільш небезпечних конструктивних параметрів фасадів, які сприяють її розвитку, а саме: наявність прилеглих кутових фасадів, додатні кути нахилу площини фасаду та відсутність віконних міжповерхових простінків.

3. На основі аналізу існуючих математичних моделей та розрахункових методів, які описують процеси поширення пожежі по зовнішнім огорожувальним конструкціям, виявлено недоліки, які полягають у недосконалій адаптації існуючих залежностей до задач теплообміну між факелом пожежі та будівлею із складними геометричними формами фасаду. Удосконалено математичну модель визначення температури полум'я під час пожежі на поверхні зовнішніх огорожувальних конструкцій, яка відрізняється від існуючих можливістю застосування уточнюючих емпіричних коефіцієнтів.

4. Створено програму експериментального дослідження процесів поширення пожежі по зовнішнім огорожувальним конструкціям та оцінювання ефективності заходів щодо її обмеження. Забезпечено оцінювання можливості поширення пожежі для різних типів фасадних систем з врахуванням їх фактичних конструктивних параметрів та найбільш несприятливих умов розвитку пожежі.

5. Обґрунтовано параметри та розроблено конструкцію установки для прогнозування поширення пожежі ззовні по фасадам будівель, що моделює фрагмент фасаду будинку та яка додатково може бути оснащена засобами запобігання поширення пожежі, зокрема протипожежними карнизами та іншими фасадними протипожежними перешкодами.

6. Сучасними статистичними методами забезпечено відтворюваність результатів та підтверджено загальну збіжність кожного окремого експерименту, при яких абсолютні відхилення між усередненими результатами експериментальних досліджень та кожною із серій експериментальних досліджень не перевищують 6%.

7. Експериментальним шляхом встановлено вплив конструктивних параметрів зовнішніх огорожувальних конструкцій на процеси зміни температур на їх поверхні, а саме для фасаду будівлі, який може знаходитися під кутом від -20° до $+20^{\circ}$ відносно вертикалі, під час 30 хвилинного впливу вогнища пожежі класу В з пожежною навантагою до 2290 МДж/м^2 значення температури на поверхні зовнішньої огорожувальної конструкції фасаду від впливу факелу пожежі може збільшуватись в 1,6-1,8 рази (для кутів від 0° до -20°) або

зменшуватись в 1,9-2,4 рази (для кутів від 0° до +20°) відносно значення температури 375-400 °С для поверхні фасаду, що знаходиться вертикально.

8. За допомогою програмного комплексу обчислювальної газогідродинаміки FDS, реалізовано модель установки для прогнозування поширення пожежі по фасадам будівель, яка відтворює умови натурних експериментальних досліджень та формалізує зв'язок між процесами нагрівання поверхні зовнішніх огорожувальних конструкцій будівлі і, відповідно, умовами поширення пожежі, а також здатністю оцінювати ефективність заходів щодо її обмеження. Доведено, що абсолютні відхилення між результатами комп'ютерного моделювання та усередненими експериментальними дослідженнями не перевищують 12 %, що дозволяє забезпечити оптимізацію процесу оцінювання поширення пожежі по фасадам будівель за рахунок реалізації використання засобів комп'ютерної газогідродинаміки.

9. Розроблено методичне забезпечення для розрахункової оцінки запобігання поширення пожежі зовнішніми огорожувальними конструкціями, яке включає спрощений метод розрахунку температури полум'я вздовж висоти фасаду із застосуванням емпіричних коефіцієнтів, які враховують конструктивне виконання фасадної системи та табличний метод оцінки та прогнозування можливості запобігання поширення пожежі по зовнішнім огорожувальним конструкціям.

10. Розроблено науково-методичний апарат, який є системою, що об'єднує створений метод натурних випробувань, спрощений метод розрахунку температури полум'я вздовж висоти фасаду, а також табличний метод визначення температури полум'я вздовж висоти фасаду, що спільно з обґрунтованими критеріями, які характеризують умови поширення пожежі по фасаду, дозволяє визначити умови запобігання поширення пожежі зовнішніми огорожувальними конструкціями будівель з негорючим облицюванням та реалізувати параметричний метод нормування вимог пожежної безпеки до будівель.

За результатом оцінювання економічного ефекту, який можливо досягти при використанні розробленого науково-методичного апарата, що реалізує параметричний метод нормування у будівництві для розрахункової оцінки поширення пожежі зовнішніми огорожувальними конструкціями будівель, встановлено, що для висотної будівлі, яка повинна бути обладнана фасадною протипожежною перешкодою, прогнозовану суму збитків від пожежі, яка поширюється фасадом будівлі, у відсотковому еквіваленті, можливо зменшити до 25% порівняно із застосуванням розпорядчого методу нормування у будівництві.

**Список публікацій, що
відображають основні наукові результати дисертації**

**Статті у періодичних виданнях,
включених до категорії «А» Переліку наукових фахових видань України,
або у закордонних виданнях, проіндексованих у базах даних**

Scopus та/або Web of Science Core Collection

1. **Ballo Y.**, Yakovchuk R., Nizhnyk V., Borysova A. Determining the effect of fire from external air conditioning units on buildings' facades *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022. Vol. 3, 10 (117). P. 72–79. (Scopus Q3).
2. Gavryliuk A., Yakovchuk, R., **Ballo Y.**, Rudyk Y. Thermal Modeling of the Electric Vehicle Fire Hazard Effects on Parking Building *SAE International Journal of Transportation Safety*. 2023, T. 11(3), P. 421–434 (Scopus Q3).
3. **Ballo Y.**, Nizhnyk, V., Veselivsky R., Kagitin O. Influence of the facade slope on fire propagation processes on higher floors. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2023. Vol.5 10 (125), P. 43–52. (Scopus Q3).

Статті в наукових періодичних виданнях інших держав

4. Pozdieiev S. V., Nizhnyk V. V., **Ballo Y. V.**, Nuianzin O. M., Uhanskyu R. V., Kropyvnytskiy V. S. Обґрунтування безпечної протипожежної відстані між ферментаторами для виробництва біогазу. *Safety & Fire Technology*. Poland, 2018. T. 51 (3). С. 60–67.

**Статті у наукових виданнях, включених до Переліку
наукових фахових видань України**

5. Сізіков О. О., **Балло Я. В.**, Добряк Д. О. та ін. До питань розрахунку протипожежного водозабезпечення об'єкта після реконструкції. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека УкрНДІЦЗ*. Київ, 2018. 1 (5). С 26–31.
6. Сізіков О. О., Ніжник В. В., **Балло Я. В.** та ін. Систематизація процесу управління пожежною безпекою об'єкта захисту *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека УкрНДІЦЗ*. Київ, 2019. 2 (8). С 41–49.
7. Ніжник В. В., **Балло Я. В.**, Поздєєв С. В., Некора В. С. Оцінка обмеження поширення пожежі між житловим будинком та автозаправною станцією. *Науково-технічний збірник Містобудування та територіальне планування КНУБА*. Київ, 2019. №69. С. 278–290.
8. Сізіков О. О., **Балло Я. В.**, Голікова С. Ю., Жихарєв О. П. Визначення процедури проведення суб'єктом управління пожежною безпекою внутрішнього аудиту з оцінки протипожежного стану об'єкта захисту *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека УкрНДІЦЗ*. Київ, 2020. №1(9). С. 84–93.
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*. Черкаси, 2020. Т. 4, №2. С. 77–88.

10. Одинець А. В., **Балло Я. В.**, Голікова С. Ю., Несенюк Л. П. Аналіз стану з пожежами та їх наслідками у висотних громадських будинках в Україні *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. Київ, 2020. №2 (10). С. 91–102.

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

12. Фещук Ю. Л., Ніжник В. В., **Балло Я. В.**, Циганков А. О. Аналіз європейського досвіду нормування вимог до конструкцій фасадної теплоізоляції в будівлях. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. Київ, 2021. №1 (11). С. 11–21.

13. Яковчук Р. С., **Балло Я. В.**, та ін. FDS моделювання ефективності протипожежних карнизів на запобігання поширенню пожежі фасадними конструкціями висотних будівель *Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності*. Львів, 2021. №23, С. 39–45.

14. **Балло Я. В.**, Голікова С. Ю., Сізіков О.О. та ін. Вимоги пожежної безпеки до висотних громадських будівель з умовною висотою від 100 м до 150 м. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. Київ, 2021. №2 (12). С. 30–42.

15. **Балло Я. В.**, Яковчук Р. С., Ніжник В. В., Кагітін О.І. Аналіз та систематизація типів фасадних систем будівель як передумова удосконалення протипожежних заходів. *Пожежна безпека*. Львів, 2022. №40, С.5–15.

16. Ніжник В. В., Сізіков О. О., Фещук Ю. Л., **Балло Я. В.** та ін. Актуальні питання розроблення вимог протипожежного захисту зарядних станцій для електромобілів. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. Київ, 2022. №1 (13). С. 15–23.

17. **Балло Я. В.**, Яковчук Р. С., Кагітін О. І., Стилик І. Г. Аналіз основних методів оцінювання поширення пожежі по фасадам будівель. *Пожежна безпека*. Львів, 2022. №41, С. 20–30.

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

19. **Балло Я. В.** Вплив нахилу фасаду на поширення пожежі по зовнішніми огорожувальними конструкціями. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. Київ, 2023. №1 (15). С. 32–40

Патенти на корисну модель

20. **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.

Статті, які додатково відображають наукові результати дисертації

21. Nizhnyk V., **Ballo Y.**, Pozdieiev S., Borovykov V., Feshchuk Y. Simulation of thermal impact of flames coming from class “B” test fire on the elements of the

adjacent facilities *International Scientific Journal «Internauka»*. Київ, 2019. №14 (76). С. 39–44.

Наукові праці, що засвідчують апробацію матеріалів дисертації

22. Балло Я. В., Ніжник В. В., Сізіков О. О., Голікова С. Ю., Довгошеєва Н. М. Застосування FDS моделювання для дослідження наслідків розвиненої стадії пожежі *Матеріали 20 Всеукраїнської науково-практичної конференції*, м. Київ, 2018. С. 29–30.

23. Ніжник В. В. Фещук Ю. Л., Балло Я. В., Голікова С. Ю. Наукові дослідження теплового впливу факелу модельного вогнища пожежі класа В на сусідні об'єкти *Матеріали XI Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист»*, м. Черкаси, 2019. С. 98–101.

24. Сізіков О.О., Ніжник В. В., Балло Я. В. Реалізація концептуальних вимог забезпечення техногенної та пожежної безпеки при експлуатації нового безпечного конфайнмента ДСП «Чорнобильська АЕС» *Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми техногенно-екологічної безпеки: освіта, наука, практика»*, м. Харків, 2019. С. 57–59.

25. 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. *Матеріали XI Міжнародної науково-практичної конференції «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій»*, м. Черкаси, 2020. С. 139–141.

26. Балло Я.В., Балло В. П., Голікова С. Ю., Скоробагатько Т. М. Проблемні питання протипожежного водопостачання висотних будинків *Матеріали «Міжнародна науково-практична конференція Проблеми надзвичайних ситуацій»*, м. Харків, 2020, С. 15–17.

27. Сізіков О. О. Балло Я. В., Ніжник В. В., Жихарєв О. П., Фещук Ю. Л. Удосконалення вимог протипожежного захисту висотних громадських будинків. *Матеріали «Міжнародна науково-практична конференція Проблеми надзвичайних ситуацій»* м. Харків, 2021, С. 95–97.

28. Кагітін О. І., Яковчук Р. С., Балло Я. В. Чисельне моделювання впливу конструктивних параметрів протипожежних карнизів на поширення пожежі фасадом висотних будинків. *Матеріали «Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених «Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту»*, м. Харків, 2021, С. 34–35.

29. Балло Я. В., Яковчук Р. С., Ковальчук В. М., Ніжник В. В., Веселівський Р. Б., Дослідження ефективності протипожежних карнизів на запобігання поширення пожежі вертикальними будівельними конструкціями висотних будівель. *9-та міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті»*, м. Харків, 2021, С.89-90.

30. Borysova A., Nizhnyk V., Ballo Ya, Kyrychenko O. Justification of reference table data of dependence of wind effect on critical surface density heat flux for corrugated

cardboard. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering «International Scientific Conference Energy Efficiency in Transport» (Scopus)*, Kharkiv, 2021. С. 1-7.

31. **Балло Я. В.** Сізіков О. О., Борисова А. С., Одинець А. В. Пожежна небезпека зовнішніх блоків кондиціонерів встановлених на фасадах будівель. *Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій: Матеріали XIII Міжнародної науково-практичної конференції*, Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2022. С. 110-111.

32. **Балло Я. В.** Сізіков О. О., Ніжник В. В., Жихарев О. П. Критерії оцінювання впливу висхідного теплового потоку на поширення пожежі по фасадним системам. *Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції*. Харків: Національний університет цивільного захисту України, 2022. С. 6-7.

33. **Балло Я. В.**, Балло В. П., Савченко О. В., Циганков А. О. До питань вітрового впливу на ефективність застосування активних водяних вогнеперешкоджувачів для обмеження поширення пожеж по фасадам будівель. *Надзвичайні ситуації: безпека та захист: Матеріали XII Всеукраїнської науковопрактичної конференції з міжнародною участю*. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2022. С. 7- 9.

34. **Балло Я. В.**, Нікулін О. Ф., Уханський Р. В., Яковчук Р. С. Удосконалення вимог пожежної безпеки в рамках закону України «про надання будівельної продукції на ринку» *Зб. наук. праць Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю*. Львів: ЛДУ БЖД, 2022. С.188-190.

35. **Ballo Ya.** Justification of the type of the fire model within the framework of fire spread limitation research building facades. *Science and innovation of modern world. Proceedings of the 3rd International scientific and practical conference. Cognum Publishing House. London, United Kingdom. 2022. P. 146-152.*

36. **Балло Я. В.** Створення математичної моделі дослідження поширення пожежі по зовнішнім огорожувальним конструкціям. *Зб. наук. Праць Міжнародної науково-практичної конференції «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій»*. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2023. С. 129-130.

37. Кагітін О., Яковчук Р., **Балло Я.**, Основні методи оцінювання поширення пожежі по фасадах будівель. *Зб. наук. праць Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених, курсантів та студентів «Проблеми та перспективи розвитку системи безпеки життєдіяльності»*. Львів: ЛДУ БЖД, 2023. С.44-47.

38. Nizhnyk V., Savchenko O., **Ballo Y.**, Nekora V. Theoretical Approaches to Justify the Coefficients of Influence of Fire Protection Systems on Individual Fire Risk. *International Scientific Conference EcoComfort and Current Issues of Civil Engineering (Scopus)*. 2023. Vol. 1, no. 290. P. 299–306.

39. **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 (Scopus)*. 2023. Vol. 2684 (1), p. 1-9.

АНОТАЦІЯ

Балло Я.В. Розвиток наукових основ запобігання поширення пожежі зовнішніми огорожувальними конструкціями будівель. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 21.06.02 – пожежна безпека. Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту, Київ, 2024.

Дисертаційна робота присвячена розв'язанню актуальної науково-прикладної проблеми у сфері пожежної безпеки – розкриття закономірностей впливу конструктивних параметрів зовнішніх огорожувальних конструкцій будівель на зміну температур на їх поверхні під час пожежі, як підґрунтя для запобігання поширення пожежі ззовні будівлі з негорючим облицюванням.

Розроблено науково-методичний апарат, який є системою, що об'єднує створений метод натурних випробувань, спрощений метод розрахунку температури полум'я вздовж висоти фасаду, а також табличний метод визначення температури полум'я вздовж висоти фасаду, що спільно з обґрунтованими критеріями, які характеризують умови поширення пожежі по фасаді, дозволяє визначити умови запобігання поширення пожежі зовнішніми огорожувальними конструкціями будівель з негорючим облицюванням та реалізувати параметричний метод нормування вимог пожежної безпеки до будівель.

Ключові слова: пожежна безпека, поширення пожежі по фасадам, обмеження поширення пожежі, фасадна протипожежна перешкода, нахилені фасади, фасадні системи.

SUMMARY

Ballo Y.V. Development of the scientific foundations of preventing the spread of fire from the exterior of the building's enclosing structures. – Qualification scientific paper which is typescript.

Dissertation work for the competition of the scientific degree of Doctor of Sciences (Engineering) by specialty of 21.06.02 – Fire safety. Institute of Public Administration and Scientific Research on Civil Protection, Kyiv, 2024.

The dissertation is devoted to the solution of an actual scientific and applied problem in the field of fire safety - the disclosure of the regularities of the influence of the parameters of the external enclosing structures of buildings on the processes of temperature changes on their surface, which became the scientific basis for the development of scientific and methodological support during the development of a new experimental and calculation tabular method of forecasting the spread of fire through external enclosing structures of buildings

An analysis of domestic and foreign theoretical and experimental studies was carried out, as well as a regulatory framework for assessing the spread of fire on the external enclosing structures of the building, and factors that could affect the limitation of the spread of fire along the facades or cause a faster spread of fire to the higher floors of the building were systematized. The necessity of comprehensive forecasting of the prevention of the spread of fire by external enclosing structures with forecasting of the

consequences of the fire and taking into account the actual structural parameters of the facade has been proved.

On the basis of the analysis of existing mathematical models and calculation methods that describe the processes of fire propagation through external enclosing structures, shortcomings were found, which consist in imperfect adaptation to the tasks of heat exchange between the fire torch and the building with complex geometric facade shapes. An idea was put forward regarding the possibility of using an improved calculation method for determining the flame temperature during a fire on the surface of external enclosing structures based on the application of clarifying empirical coefficients.

The criteria that characterize the conditions of fire propagation in a building with a non-combustible facade, which correspond to the value of the temperature of destruction of transparent facade structures and the duration of temperature influence on them, are substantiated.

A program of experimental research into the processes of fire propagation through external enclosing structures and evaluation of the effectiveness of measures to limit it is presented. An assessment of the possibility of fire spread is provided for various types of facade systems, taking into account their actual design parameters and the most unfavorable conditions for the development of fire.

The parameters are substantiated and the design of the installation for predicting the spread of fire on the facades of buildings, which simulates a fragment of the facade of the building and which can additionally be equipped with means of preventing the spread of fire, in particular fire eaves and other facade fire barriers, has been developed. The reproducibility of the results is ensured and the general convergence of each individual experiment is confirmed, in which the absolute deviations between the averaged results of experimental studies and each of the series of experimental studies do not exceed 10%.

With the help of the software complex of computational gas-hydrodynamics FDS, a model of the installation for predicting the spread of fire along the facades of buildings was implemented, which reproduces the conditions of real experimental studies and formalizes the connection between the processes of heating the surface of the external enclosing structures of the building and, accordingly, the conditions of fire spread, as well as the ability to evaluate the effectiveness of measures to limit it.

A methodology for calculating the spread of fire through the external enclosing structures of buildings and evaluating the effectiveness of measures to limit it has been developed, which includes: a calculation-table method for estimating the temperature near the surface of the facade above the floor and a simplified method based on the equation $T_z = (T_w - T_0) \times [1 - 0,4725(L_f \cdot w_f / Q)] \times (\alpha \text{ or } \beta) + T_0$ using clarifying empirical coefficients.

A new full-scale method of experimental research is proposed, which is based on the reproduction of the structural parameters of a fragment of the facade system and the most unfavorable conditions for the development of fire without the use of adaptation of facade systems and building materials for their cladding to existing

standardized stands, installations and fragments of buildings for conducting simulation tests.

A scientific and methodological apparatus was developed, which is a system that combines the created method of field tests, a simplified method of calculating the flame temperature along the height of the facade, as well as a tabular method of determining the temperature of the flame along the height of the facade, which together with justified criteria, which characterize the conditions for the spread of fire along the facade, allow to determine the conditions for preventing the spread of fire by external enclosing structures of buildings with non-combustible cladding and to implement a parametric method of standardizing fire safety requirements for buildings. The experimental and calculation principles of ensuring the accuracy of assessing the dynamics of temperature changes and the nature of temperature distributions from a fire on the surface of external enclosing structures located above, depending on the angles of inclination of the main facade plane and the angle of adjacency of the lateral plane of the facade to the main part of the facade, have been further developed, and the reproducibility of the results of experimental studies in which the values of absolute deviations between the averaged experimental studies do not exceed 10%.

Key words: fire safety, spread of fire on facades, limitation of fire spread, facade fire barrier, inclined facades, facade systems.