

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА УКРАЇНИ З НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ
Львівський державний університет безпеки життєдіяльності

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Кагітін Олександр Іванович

УДК 614.841.45

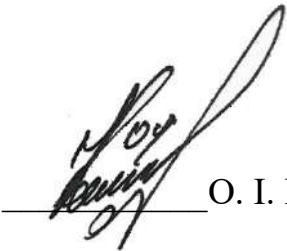
ДИСЕРТАЦІЯ

**ПІДВИЩЕННЯ ПОЖЕЖНОЇ БЕЗПЕКИ КОНСТРУКЦІЙ
ЗОВНІШНІХ СТІН ЖИТЛОВИХ БУДИНКІВ ІЗ ФАСАДНОЮ
ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЄЮ ТА ГОРЮЧИМ УТЕПЛЮВАЧЕМ**

Спеціальність – 261 Пожежна безпека
Галузь знань – 26 Цивільна безпека

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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



О. І. Кагітін

Науковий керівник: **Яковчук Роман Святославович**
доктор технічних наук, доцент

Львів – 2024

АНОТАЦІЯ

Kagimін O.I. Підвищення пожежної безпеки конструкцій зовнішніх стін житлових будинків із фасадною теплоізоляцією та горючим утеплювачем. Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 261 Пожежна безпека. Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Львів, 2024.

Зміст анотації:

Актуальність теми.

В теперішній час у практиці будівництва для зменшення тепловтрат використовують різні теплоізоляційні матеріали, такі як пінополістирол, мінеральна вата, пінополіуретан, скловата, перліт тощо. Сучасні теплоізоляційні матеріали мають широкий діапазон застосування, за допомогою них виконують утеплення покрівель, зовнішніх, внутрішніх та підвальних стін, перекриття та підлоги. Одним із найбільш розповсюджених застосувань теплоізоляційних матеріалів є утеплення фасадів будинків. Конструкцією зовнішніх стін із фасадною теплоізоляцією є конструкція, яка складається з несучої частини стіни та комплекту теплової ізоляції і призначена для забезпечення нормативних значень теплотехнічних показників стінових конструкцій, захисту будівель і споруд від впливу навколишнього середовища, забезпечення нормативного мікроклімату будівель і споруд та надання фасадам будівель і споруд привабливого естетичного вигляду.

Крім позитивних переваг, роботи з термомодернізації можуть збільшувати пожежну навантагу будинків, бо застосування горючого теплоізоляційного матеріалу впливатиме на пожежну небезпеку будівель із фасадною теплоізоляцією. Горіння полімерів — це складне фізико-хімічне явище, що включає процеси тепло- та масообміну, хімічну кінетику реакцій як у конденсованій, так і в газовій фазах, а також інші фактори. Широкий асортимент полімерних матеріалів за хімічною будовою та

складом, їх багатокomпонентність, поєднання з іншими будівельними матеріалами та широке застосування у будівництві зумовлюють специфічні умови виникнення, розвитку та гасіння пожеж фасадів будинків. У будівельній галузі близько 80% теплоізоляційного матеріалу становить пінополістирол, який має значні недоліки з точки зору пожежної небезпеки: він є горючим матеріалом, під час пожежі виділяє токсичні продукти, а також значно впливає на вогнестійкість будівельних конструкцій із фасадною теплоізоляцією.

Розвиток наукових положень пожежної безпеки полімерних матеріалів з метою розробки більш безпечних і стійких до вогню матеріалів базується на фундаментальних теоретичних та експериментальних дослідженнях J.W. Gilman, C.L. Jackson, M. Lewin, J. Ebdon, S. Billmeyer, I. Stengel, D. Duffey, J. Anderson, R. Jansson та інші. В останні роки значних успіхів досягнуто в галузі математичного моделювання процесів, що характеризують розвиток пожеж в будівлях різного призначення. Ці досягнення пов'язані перш за все з роботами Томаса Ф., Драздейла Д., Квінтієрі Д., Б. Г. Демчини, Т. М. Шналя, С. В. Поздєєва, В. В. Ніжника, О. В. Некори та інших.

В Україні проблемами пожежної небезпеки полімерних теплоізоляційних матеріалів та збірних систем фасадної теплоізоляції займалися Р. С. Яковчук, А. Д. Кузик, Я. В. Балло, Т. М. Скоробогатько, Ю. Л. Фещук, А. В. Довбиш, С. В. Новак, Р. В. Климась, Якименко О.П., Третьякова О.В., В. Г. Дагіль та інші.

Приклади пожеж, що поширюються по фасадних системах будівель, вказують на їх особливу небезпеку. Ця небезпека безпосередньо залежить від конструктивних особливостей конкретної будівлі, типу використаного теплоізоляційного матеріалу та параметрів самої пожежі. Найчастішими причинами займання конструкцій зовнішніх стін із фасадною теплоізоляцією та штукатурним покриттям є перекидання вогню з віконного прорізу внаслідок інтенсивної пожежі всередині приміщення. В

таких умовах конвекційні потоки тепла можуть спричинити займання горючого облицювання зовнішніх стін. На процес поширення вогню фасадними системами впливає низка факторів. Серед них можна виділити наступні: зовнішні умови (теплові потоки з віконних прорізів, температурні режими горіння теплоізоляційного матеріалу); пожежно-технічні характеристики матеріалу теплоізоляції (температура займання, швидкість поширення вогню по матеріалу, температура самозаймання та інші); архітектурні та об'ємно-планувальні характеристики будівлі.

Для запобігання поширенню пожежі в будівлях використовуються автоматичні системи протипожежного захисту, такі як автоматичні системи пожежогасіння, системи пожежної сигналізації та протидимного захисту, а також протипожежні перешкоди, зони, відсіки, тамбур-шлюзи, пояси, розриви і т. д. Використання протипожежних поясів з негорючих мінераловатних плит у конструкціях зовнішніх стін із фасадною теплоізоляцією дозволяє обмежити поширення пожежі або зменшити швидкість поширення вогню по поверхні фасаду. Такі протипожежні заходи будуть ефективними під час пожежі лише за умови їх правильного технічного виконання. Використання горючих матеріалів для цих цілей, а також помилки під час проектування та монтажу значно підвищують рівень пожежної небезпеки будівель з фасадною теплоізоляцією. У національних нормативних документах процедура облаштування протипожежних поясів та обрамлення віконних та дверних прорізів недостатньо детально описана технічно. Часто відбуваються ситуації, коли вимоги нормативних документів стосовно улаштування систем фасадної теплоізоляції неправильно тлумачаться або взагалі ігноруються. Це може статися через брак досвіду у виконавців, що виконують монтажні роботи або через навмисне нехтування правилами пожежної безпеки задля економії коштів під час будівництва.

Обмеження поширення пожежі є однією з основних вимог як вітчизняних, так і зарубіжних будівельних норм. Однією з актуальних

проблем пожежної безпеки є обмеження поширення вогню по фасадах будівель та оцінка ефективності заходів для його стримування. На сьогоднішній день у країнах Європи, Азії та США немає єдиних підходів до методів і критеріїв, які визначають досягнення умов обмеження поширення пожежі по поверхні зовнішніх вертикальних будівельних конструкцій.

Застосування протипожежних карнизів в якості фасадної протипожежної перешкоди є одним із базових заходів передбачених державними будівельними нормами ДБН В.1.1-7:2016 “Пожежна безпека об’єктів будівництва” та ДБН В.2.2-41:2019 “Висотні будівлі. Основні положення”. Слід відзначити, що застосування протипожежних карнизів можливо не тільки для висотного будівництва, але і для багатоповерхових будівель та будівель підвищеної поверховості, які розділені на декілька вертикальних протипожежних відсіків. Як приклад, такі випадки притаманні для житлових, громадських та адміністративних будівель у складі яких можливо розміщення вбудованих приміщень іншого функціонального призначення (магазинів, кафе, закладів надання соціальних послуг тощо).

Єдиний метод, який регламентує встановлення протипожежного карнизу згідно будівельних норм та стандартів, є розпорядчим. Тобто, існує лише опис даного об’єкту нормування у будівництві (параметри конструкції, вимоги до матеріалів, тощо), що не передбачає альтернативи даного рішення. Для забезпечення вимоги щодо обмеження поширення фасадної пожежі відсутній опис критерію, який роз’яснює цілі нормативного положення.

Фактично єдиною вимогою щодо параметрів протипожежного карнизу є його ширина, що виступає за межі фасаду, а також клас вогнестійкості не менше EI 90. Даний підхід не дозволяє оцінювати ефективність запропонованого заходу для того чи іншого типу фасаду, а також враховувати його фактичну пожежну небезпеку. Разом із тим,

параметри фасадних систем та зовнішніх огорожувальних конструкцій можуть значно впливати на процеси поширення пожежі, як в частині її обмеження так і навпаки – бути причиною її швидкого поширення на вище розташовані поверхи та протипожежні відсіки.

Ключовою проблематикою облаштування протипожежних карнизів є те, що в теперішніх будівельних нормах, незалежно від параметрів віконного міжповерхового простінку, розмір карнизу залишається незмінним. Він становить 0,3 м або 0,75 м, в залежності від умовної висоти будинку та його функціонального призначення, та приймається виключно розпорядчим методом нормування. Таким чином, актуальними науковим завданням є дослідження конструктивних параметрів фасаду житлової будівлі та їх вплив на процеси обмеження поширення вогню поверхнею конструкцій зовнішніх стін із фасадною теплоізоляцією.

З огляду на вищезазначене, можна стверджувати, що розкриття закономірностей поширення вогню поверхнею конструкцій зовнішніх стін із фасадною теплоізоляцією на основі пінополістиролу з опорядженням штукатурками та чинників, які впливають на ефективність застосування протипожежних перешкод, як підґрунтя для підвищення пожежної безпеки житлових будинків із фасадною теплоізоляцією та горючим утеплювачем є актуальним науково-технічним завданням, що дасть змогу істотно підвищити пожежну безпеку збірних систем фасадної теплоізоляції житлових будинків.

Метою роботи є розкриття закономірностей поширення вогню поверхнею конструкцій зовнішніх стін із фасадною теплоізоляцією на основі пінополістиролу з опорядженням штукатурками та чинників, які впливають на ефективність застосування протипожежних перешкод, як підґрунтя для підвищення пожежної безпеки житлових будинків із фасадною теплоізоляцією та горючим утеплювачем.

Задачі дослідження:

1. Виконати аналіз пожежної небезпеки та розкрити особливості процесу горіння конструкцій зовнішніх стін із фасадною теплоізоляцією та горючим утеплювачем житлових будинків, розглянути типові сценарії розповсюдження вогню їх поверхнею; розкрити механізм поширення вогню поверхнею фасадної теплоізоляції на основі пінополістиролу.

2. Виконати аналіз протипожежних заходів у конструкціях зовнішніх стін із фасадною теплоізоляцією та опорядженням штукатуркою, які забезпечують обмеження поширення вогню по фасаду, особливостей їх облаштування та конструктивні параметри.

3. Обґрунтувати методику експериментальних досліджень на основі аналізу міжнародних та національних стандартів, літературних та інших джерел інформації стосовно існуючих методів натурних випробувань пожежної небезпеки збірних систем фасадної теплоізоляції будинків з опорядженням штукатурками та методів її оцінювання.

4. Провести натурні вогневі випробування збірних систем фасадної теплоізоляції з опорядженням штукатурками на поширення вогню у відповідності до вимог ДСТУ 9072:2021.

5. Виконати комп'ютерне моделювання натурних вогневих випробувань конструкції зовнішньої стіни із фасадною теплоізоляцією з опорядженням штукатуркою на поширення вогню в середовищі FDS та перевірити розроблену модель на адекватність шляхом порівняння отриманих чисельних даних з результатами експериментальних досліджень.

6. Дослідити чинники, які впливають на ефективність протипожежних карнизів для запобігання поширення пожежі поверхнею збірних систем фасадної теплоізоляції житлових будинків. Виконати повний факторний числовий експеримент та отримати таблицю зі зведеними даними щодо максимального значення температури біля поверхні фасаду в залежності

від ширини протипожежного карнизу та висоти віконного міжповерхового простінку.

Об’єкт дослідження – процес поширення вогню поверхнею конструкцій зовнішніх стін житлових будинків із фасадною теплоізоляцією з опорядженням штукатурками.

Предмет дослідження – вплив параметрів фасаду та розмірів протипожежного карнизу на процеси обмеження поширення вогню поверхнею конструкцій зовнішніх стін житлових будинків із фасадною теплоізоляцією на основі пінополістиролу.

Методи дослідження. У дисертаційній роботі використано системний підхід та низку загальнонаукових та спеціальних методів досліджень. Аналітичний метод досліджень використовували для аналізу міжнародних та національних стандартів, керівних та технічних документів, рекомендацій, посібників, довідників, протоколів випробувань та інших літературних джерел, інформації мережі Internet. Натурні вогневі випробування збірних систем фасадної теплоізоляції з опорядженням штукатурками на поширення вогню виконували згідно Методу натурних вогневих випробувань збірних систем фасадної теплоізоляції з опорядженням штукатурками та дрібноштучними елементами на поширення вогню. Чисельне моделювання динаміки розвитку та поширення пожежі поверхнею збірної системи фасадної теплоізоляції за допомогою програмного забезпечення FDS, в основі якого закладена система диференціальних рівнянь неперервних середовищ типу рівнянь Нав’є-Стокса у числовій реалізації за методом кінцевих різниць і методу контрольних об’ємів, рівняння нестационарної теплопровідності у числовій реалізації за методом кінцевих різниць. Теорія планування експерименту, методи теорії імовірності та математичної статистики були використані під час обробки результатів експериментів та перевірки достовірності отриманих результатів.

Наукова новизна дисертаційної роботи полягає у розкритті закономірностей поширення вогню поверхнею конструкцій зовнішніх стін із фасадною теплоізоляцією на основі пінополістиролу з опорядженням штукатурками та чинників, які впливають на ефективність застосування протипожежних перешкод.

З огляду на це, **вперше:**

встановлено залежність критерію безпеки щодо не перевищення критичної температури у 250 °С, який досягається необхідними параметрами фасаду та протипожежного карнизу, а саме: мінімальної ширини протипожежного карнизу не менше 0,4 м при висоті віконного міжповерхового простінку 1,0 м; мінімальної ширини протипожежного карнизу 0,5 м при висоті віконного простінку 0,6 м.

Удосконалено:

методику натурних вогневих випробувань збірних систем фасадної теплоізоляції з опорядженням штукатурками на поширення вогню на основі нових теоретичних та експериментальних даних з урахуванням вимог європейських, міжнародних і національних стандартів.

Набуло подальшого розвитку:

застосування експериментальних та обчислювальних методик для визначення реальних розподілів температури поверхнею конструкцій зовнішніх стін житлових будинків із фасадною теплоізоляцією на основі пінополістиролу з урахуванням особливостей конструктивних рішень в житлових будівлях.

Достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій забезпечується: використанням достовірних вихідних даних, що отримані за результатами теоретичних і експериментальних досліджень; високою схожістю отриманих теоретичних результатів з результатами натурних вогневих випробувань збірних систем фасадної теплоізоляції з горючим утеплювачем на поширення вогню; використанням сучасного методу математичного моделювання за допомогою програмного комплексу Fire

Dynamics Simulator (FDS); тотожністю одержаних теоретичних результатів дослідження з результатами досліджень інших авторів; підтвердженням адекватності запропонованих моделей та одержаними результатами експериментальних досліджень разом із статистичною обробкою їх результатів.

Обґрунтованість одержаних положень, результатів, висновків і рекомендацій підтверджується: коректністю застосування апробованого в науковій практиці дослідного й аналітичного апарату; порівнянням результатів дослідження з даними вітчизняного та іноземного досвіду; досвідом практичної реалізації результатів дослідження в практичній діяльності служби цивільного захисту, у двох науково-дослідних роботах; публікацією результатів дослідження у вітчизняних фахових та іноземних наукових виданнях; обговоренням результатів дослідження на міжнародних та всеукраїнських науково-практичних конференціях.

Практичне значення отриманих результатів. Практична цінність дисертаційних досліджень полягає у тому, що отримані наукові результати дадуть змогу переглянути критерії ефективності обмеження поширення фасадної пожежі з їх подальшою інтеграцією в систему протипожежного захисту будівель та споруд. Результати дисертаційного дослідження можуть бути використаними проєктними установами для удосконалення нормативної бази у галузі пожежної безпеки будівництва.

Удосконалена процедура проведення випробувань та оцінювання їх результатів для методики натурних вогневих випробувань збірних систем фасадної теплоізоляції з опорядженням штукатурками на поширення вогню використовується в Інституті державного управління та наукових досліджень у сфері цивільного захисту, також результати дисертаційної роботи впроваджено у наукову діяльність науково-випробувального центру шляхом застосування отриманої науково-методичної та експериментальної бази під час дослідження процесів поширення пожежі

поверхнею конструкцій зовнішніх стін житлових будинків із фасадною теплоізоляцією та горючим утеплювачем.

Крім того, результати дисертаційного дослідження впроваджено у практичне використання будівельно-проектною організацією ТзОВ “ЮДК ПРОЕКТ” під час проектування нових цивільних об’єктів, а також під час розробки проектів з реконструкції таких будівель. Об’єктом впровадження є рекомендації щодо розробки та обґрунтування ефективності конструктивних параметрів протипожежних перешкод, які розташовуються по контуру багатоповерхових будинків для запобігання розповсюдження вогню поверхнею конструкцій зовнішніх стін житлових будинків із фасадною теплоізоляцією та горючим утеплювачем.

З метою підвищення ефективності підготовки фахівців для ДСНС України результати дисертаційної роботи, які мають теоретичне та практичне значення, впроваджено в освітній процес Львівського державного університету безпеки життєдіяльності. Зокрема, на кафедрі цивільного захисту та протимінної діяльності – у навчальну дисципліну «Профілактична діяльність у сфері цивільного захисту», тема «Забезпечення надійності та безпечної експлуатації будівель» підготовки бакалавра зі спеціальності 263 «Цивільна безпека». На кафедрі наглядово-профілактичної діяльності та пожежної автоматики – у навчальну дисципліну «Пожежна профілактика в населених пунктах», тема «Протипожежні вимоги при проектуванні та експлуатації житлових будівель та гуртожитків» підготовки бакалавра зі спеціальності 261 «Пожежна безпека». Результати роботи використані в лекційних курсах зазначених навчальних дисциплін при викладенні теоретичних положень щодо аналізу національної та міжнародної нормативної бази щодо вимог пожежної безпеки до збірних систем фасадної теплоізоляції зовнішніх стін будинків і споруд та методів їх оцінювання, а також дослідження впливу протипожежних перешкод на запобігання поширення пожежі вертикальними будівельними конструкціями житлових будівель.

У вступі описана загальна характеристика роботи, обґрунтовано актуальність теми дисертаційного дослідження, розкрито зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами, сформульовано мету, завдання, об'єкт та предмет дослідження, розкрито наукову новизну та практичне значення одержаних результатів, визначено особистий внесок здобувача, наведено дані про апробацію, публікації, структуру та обсяг роботи.

У першому розділі було проаналізовано сучасний стан використання фасадної теплоізоляції та її вплив на пожежну безпеку будівель та споруд.

Завдяки виконаному аналізу виявлено, що застосування горючих теплоізоляційних матеріалів як утеплювачів фасадів є економічно вигідним, однак становить підвищену небезпеку для життя та здоров'я людей під час пожежі. Тому проблема забезпечення пожежної безпеки будівель, в яких застосовуються теплоізоляційно-оздоблювальні системи зовнішніх стін, потребує ретельного дослідження.

Статистичні дані про пожежі свідчать, що в середньому 68% пожеж у багатоповерхових житлових та громадських будинках супроводжувалися поширенням пожежі на верхні поверхи в результаті поширення полум'я поверхнею фасаду, при цьому на сьогодні аналізу наслідків від таких пожеж, з врахуванням конструктивних особливостей для найбільш поширених типів фасадів, фактично немає.

Проаналізовано та описано особливості процесів, що відбуваються під час горіння теплоізоляційно-оздоблювальної системи зовнішніх стін житлових будинків. Представлено типові сценарії поширення вогню по поверхні зовнішніх стін із фасадною теплоізоляцією, що має горючий утеплювач та штукатурне покриття. Описано механізм поширення вогню через віконний отвір по фасадній теплоізоляції на основі пінополістиролу.

Результати виконаного аналізу літературних джерел дали можливість сформулювати мету й завдання для її досягнення.

У другому розділі було проведено аналіз міжнародної та національної нормативної бази щодо вимог пожежної безпеки до збірних систем фасадної теплоізоляції зовнішніх стін будинків та методів їх випробувань. Більшість з розглянутих методів вогневих випробувань фасадних систем у європейських країнах передбачають використання конфігурацій випробувального стенда, за яких сценарій пожежі відповідає виходу шлейфу продуктів згоряння крізь проріз у зовнішній поверхні будинку, що піднімається вздовж поверхні фасаду. Розміри модельних вогнищ пожежі і національні методи випробування суттєво відрізняються.

Проаналізовано протипожежні заходи у конструкціях зовнішніх стін із фасадною теплоізоляцією та опорядженням штукатуркою, а також особливості їх облаштування, враховуючи досвід інших країн. Розглянуто та проаналізовано види, конструктивні особливості, призначення та функції протипожежних поясів та обрамлення віконних (дверних) прорізів, виконаних з негорючих матеріалів, які влаштовуються в конструкціях зовнішніх стін із фасадною теплоізоляцією та опорядженням штукатуркою. Наголошено на значну роль протипожежних поясів та обрамлення віконних (дверних) прорізів із негорючих плит з мінеральної вати у забезпеченні пожежної безпеки будівель та споруд. В Україні на національному рівні в нормативних документах процедура облаштування протипожежних поясів та обрамлення навколо віконних та дверних прорізів недостатньо технічно описана (розкрита), що призводить до випадків неправильного трактування цих вимог або взагалі їх нехтування.

У третьому розділі виконано обґрунтування параметрів випробувального обладнання і процедури проведення випробувань збірних систем фасадної теплоізоляції з опорядженням штукатурками на поширення вогню.

Обґрунтовано тривалість випробування, описано конструкцію фрагмента будинку, модельне вогнище пожежі, експериментальне обладнання та методику натурних вогневих випробувань збірних систем

фасадної теплоізоляції з опорядженням штукатурками та дрібноштучними елементами на поширення вогню.

Сутність випробувань полягала у визначенні розмірів пошкодження і значення підвищення температури у збірній системі фасадної теплоізоляції, що нанесена на фрагмент двоповерхового будинку, на першому поверсі якого створювали температурний режим, наближений до стандартного.

Запропоновано підхід щодо визначення розширеної сфери застосування результатів випробувань збірної системи фасадної теплоізоляції.

У четвертому розділі проаналізовано результати натурних вогневих випробувань конструкцій зовнішніх стін житлових будинків із фасадною теплоізоляцією та горючим утеплювачем на поширення вогню.

За результатами натурних вогневих випробувань конструкції зовнішньої стіни із фасадною теплоізоляцією з опорядженням штукатуркою та утеплювачем з пінополістирольних плит на поширення вогню встановлено, що поширення полум'я по поверхні фасадної теплоізоляції за межі її безпосереднього контакту з полум'ям із вогневої камери не відбувалося.

У п'ятому розділі виконано комп'ютерне моделювання вогневого випробування системи фасадної теплоізоляції за допомогою програмного забезпечення FDS. Це дозволило отримати чисельні та графічні дані, що відображають процес виникнення, поширення і розвитку пожежі по поверхні системи фасадної теплоізоляції будинку. Отримані результати моделювання відтворили реальні умови випробування з належною точністю, а порівняння експериментальних даних з результатами чисельних розрахунків підтвердило адекватність моделі та збіжність отриманих результатів.

Досліджено вплив параметрів фасаду та ширини протипожежного карнизу на запобігання поширення пожежі зовнішніми вертикальними

конструкціями на прикладі житлової будівлі. З використанням FDS-моделювання досліджено взаємозв'язки параметрів зовнішніх огорожуючих конструкцій та протипожежного карнизу на процеси обмеження поширення пожежі. Визначено вплив мінімальних параметрів висоти міжповерхового віконного простінку за відсутності протипожежного карнизу на поширення пожежі. Встановлено залежності зміни температури біля поверхні фасаду від ширини протипожежного карнизу та висоти віконного міжповерхового простінку.

Ключові слова: пожежна безпека, теплообмін, критична температура, вогнестійкість, тепловий потік, фасадна теплоізоляція, горючість, тепловиділення, теплоізолюючі матеріали, розповсюдження полум'я, математична модель, комп'ютерне моделювання, протипожежний карниз.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях України:

1. Яковчук Р. С., Балло Я. В., Кузик А. Д., **Кагітін О. І.**, Ковальчук В.М. (2021). FDS моделювання ефективності протипожежних карнизів на запобігання поширенню пожежі фасадними конструкціями висотних будівель. *Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності*, 23, С. 39-45.

DOI: <https://doi.org/10.32447/20784643.23.2021.06>

2. Яковчук Р. С., **Кагітін О. І.**, Лоїк В. Б., Синельников О. Д., Галанченко Р. Р., Возняк О. О. (2021). Аналіз чинників, які впливають на поширення вогню конструкцією фасадної теплоізоляції з вентильованим повітряним прошарком. *Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності*, 24, 57-65.

DOI: <https://doi.org/10.32447/20784643.24.2021.07>

3. Балло Я. В., Яковчук Р. С., Ніжник В. В., **Кагітін О. І.** (2022). Аналіз та систематизація типів фасадних систем будівель як передумова

удосконалення протипожежних заходів. *Пожежна безпека*, 40, С. 5-15.

DOI: <https://doi.org/10.32447/20786662.40.2022.01>

4. Балло Я. В., Яковчук Р. С., **Кагітін О. І.**, Стилик І. Г. (2022). Аналіз основних методів оцінювання поширення пожежі по фасадах будівель. *Пожежна безпека*, 41, С. 20-30.

DOI: <https://doi.org/10.32447/20786662.41.2022.03>

5. **Кагітін О. І.**, Веселівський Р. Б. (2023). Обґрунтування процедури проведення випробувань збірних систем фасадної теплоізоляції на поширення вогню. *Пожежна безпека*, 43, 63-75.

DOI: <https://doi.org/10.32447/20786662.43.2023.08>

Статті у наукових виданнях, що входять до бази даних Scopus

1. Roman Yakovchuk, Andriy Kuzyk, **Olexander Kagitin**, Andriy Ivanusa and Sergiy Yemelyanenko (2021). FDS simulation of fire spreading on façade heat insulating system. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 635 (2021) 012009. Режим доступу:

<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/635/1/012009/pdf>

DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/635/1/012009>

2. Ballo, Y., Nizhnyk, V., Veselivsky, R., **Kagitin, O.** (2023). Influence of the facade slope on fire propagation processes on higher floors. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (10 (125)), 43–52.

DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.288174>

3. **Kagitin, O.**, Veselivskyi, R., Havrys, A., Ballo, Y., Yakovchuk, R., Kovalyshyn, B. (2024). Determining the influence of facade parameters and the width of a fire-proof eaves on preventing the spread of fire through external vertical structures of buildings. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (1 (130)), 6–16.

DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.303640>

Матеріали науково-практичних конференцій, що засвідчують апробацію дисертації:

1. Яковчук Р. С., **Кагітін О. І.**, Скоробагатько Т. М. Моделювання параметрів вогневого випробування конструкції зовнішньої стіни із фасадною теплоізоляцією у середовищі FDS. *Надзвичайні ситуації: безпека та захист: матеріали X Всеукраїнської наук.-практ. конф. з міжнародною участю*. Черкаси: ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗУ, 2020. С. 305-307.
2. Яковчук Р. С., Балло Я. В., **Кагітін О. І.** Чисельне моделювання впливу конструктивних параметрів протипожежних карнизів на поширення пожежі фасадом висотних будинків. *Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту: матеріали Міжнародної наук.-практ. конф. молодих учених*. Харків: НУЦЗУ, 2021. С. 34-35.
3. Яковчук Р. С., Балло Я. В., **Кагітін О. І.** Заходи підвищення пожежної безпеки конструкцій фасадної теплоізоляції з вентильованим повітряним прошарком. *Наука про цивільний захист як шлях становлення молодих вчених: матеріали Всеукраїнської наук.-практ. конф. курсантів, студентів, ад'юнктів (аспірантів)*. Черкаси: Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2022. С. 32-33.
4. Яковчук Р. С., Балло Я. В., **Кагітін О. І.** Основні методи оцінювання поширення пожежі по фасадах будівель. *Проблеми та перспективи розвитку системи безпеки життєдіяльності: зб. наук. праць Міжнародної наук.-практ. конф. молодих вчених, курсантів та студентів*. Львів: ЛДУ БЖД, 2023. С.44-47.

SUMMARY

Kagitin O.I. Improving the fire safety of structures of external walls of residential buildings with facade thermal insulation and combustible insulation. Qualifying scientific work on manuscript rights.

Dissertation for the Doctor of Philosophy degree in specialty 261 "Fire Safety". Lviv State University of Life Safety, Lviv, 2024.

The content of the abstract:

Actuality of theme.

Currently, various thermal insulation materials such as expanded polystyrene, mineral wool, polyurethane foam, glass wool, perlite, etc. are used in construction practice to reduce heat loss. Modern thermal insulation materials have a wide range of applications; they are used to insulate roofs, exterior, interior and basement walls, ceilings and floors. One of the most common applications of thermal insulation materials is the insulation of building facades. The construction of exterior walls with facade insulation is a structure consisting of a load-bearing part of the wall and a thermal insulation kit designed to ensure the standard values of thermal performance of wall structures, protect buildings and structures from environmental influences, ensure the standard microclimate of buildings and structures, and give the facades of buildings and structures an attractive aesthetic appearance.

In addition to the positive benefits, thermal modernization work can increase the fire load of buildings, as the use of combustible insulation material will affect the fire hazard of buildings with facade insulation. The combustion of polymers is a complex physical and chemical phenomenon that involves heat and mass transfer processes, chemical kinetics of reactions in both condensed and gaseous phases, and other factors. A wide range of polymeric materials in terms of chemical structure and composition, their multicomponent nature, combination with other building materials and widespread use in the construction industry determine the specific conditions for the occurrence, development and extinguishing of building facade fires. In the construction

industry, about 80% of thermal insulation material is expanded polystyrene, which has significant disadvantages in terms of fire hazard indicators: it is a combustible material, releases toxic products during a fire, and has a significant impact on the fire resistance of building structures with facade insulation.

The development of scientific provisions of fire safety of polymeric materials with the aim of developing safer and more resistant to fire materials is based on fundamental theoretical and experimental studies by J.W. Gilman, C.L. Jackson, M. Lewin, J. Ebdon, S. Billmeyer, I. Stengel, D. Duffey, J. Anderson, R. Jansson and others. In recent years, significant progress has been made in the field of mathematical modeling of processes characterizing the development of fires in buildings for various purposes. These achievements are primarily associated with the works of Thomas F., Draddale D., Quintieri D., B. G. Demchyna, T. M. Schnall, S. V. Pozdeyev, V. V. Nizhnyk, O. V. Nekora and others.

In Ukraine, R. S. Yakovchuk, A. D. Kuzyk, Y. V. Ballo, T. M. Skorobohatko, Y. L. Feshchuk, A. V. Dovbysh, S. V. Novak, R. V. Klymas, O. P. Yakymenko, O. V. Tretyakova, V. G. Dagil and others have been dealing with the problems of fire hazard of polymeric thermal insulation materials and prefabricated facade insulation systems.

Examples of fires spreading across building facade systems indicate their particular danger. This danger directly depends on the structural features of the specific building, the type of insulation material used, and the parameters of the fire itself. The most common causes of ignition in exterior wall constructions with facade insulation and plaster coating are flames spreading from window openings due to intense internal fires. Under these conditions, convective heat flows can ignite the combustible cladding of exterior walls. Several factors influence the fire spread process in facade systems, including external conditions (heat flows from window openings, burning temperature regimes of insulation material); fire-technical characteristics of the insulation material

(ignition temperature, flame spread rate, self-ignition temperature, etc.); and architectural and spatial characteristics of the building.

To prevent the spread of fire in buildings, automatic fire protection systems are used, such as automatic fire extinguishing systems, fire alarm systems, and smoke control systems, as well as fire barriers, zones, compartments, airlocks, belts, and gaps, etc. The use of fire belts made of non-combustible mineral wool boards in the construction of exterior walls with facade insulation can limit the spread of fire or reduce the speed of fire spread along the facade surface. Such fire protection measures will only be effective during a fire if they are properly executed. The use of combustible materials for these purposes, as well as errors in design and installation, significantly increase the level of fire hazard in buildings with facade insulation. National regulatory documents do not sufficiently detail the technical procedure for installing fire belts and framing window and door openings. Often, there are situations where the requirements of regulatory documents regarding the installation of facade insulation systems are misinterpreted or completely ignored. This can occur due to a lack of experience among the installers or deliberate neglect of fire safety rules to save costs during construction.

Limiting the spread of fire is one of the primary requirements of both domestic and international building regulations. A critical issue in fire safety is restricting the spread of fires on building facades and assessing the effectiveness of measures to contain them. Currently, there are no unified approaches regarding the methods and criteria for limiting fire spread on the exterior vertical surfaces of buildings in Europe, Asia, or the USA.

The use of fire-resistant cornices as a facade fire barrier is one of the fundamental measures specified in the national building codes DBN B.1.1-7:2016 "Fire Safety of Construction Objects" and DBN B.2.2-41:2019 "High-rise Buildings. Basic Provisions." It is noteworthy that fire-resistant cornices can be applied not only to high-rise constructions but also to multi-story buildings and buildings of increased height that are divided into several vertical fire

compartments. For instance, such cases are typical for residential, public, and administrative buildings that may include built-in premises of other functional purposes (shops, cafes, social service facilities, etc.).

The only method regulating the installation of a fire-resistant cornice according to building codes and standards is prescriptive. This means there is merely a description of the object to be regulated in construction (construction parameters, material requirements, etc.) without providing alternative solutions. To ensure the requirement of limiting facade fire spread, there is no criterion explaining the objectives of the normative provision.

Essentially, the only requirement regarding the parameters of the fire-resistant cornice is its width extending beyond the facade and a fire resistance rating of at least EI 90. This approach does not allow for the assessment of the proposed measure's effectiveness for a particular type of facade, nor does it account for its actual fire hazard. Meanwhile, the parameters of facade systems and external enclosing structures can significantly affect the processes of fire spread, either limiting it or, conversely, causing its rapid spread to higher floors and fire compartments.

A key issue in the installation of fire-resistant cornices is that current building codes mandate a fixed size of the cornice regardless of the parameters of the window inter-floor partition. The cornice size remains unchanged at either 0.3 m or 0.75 m, depending on the building's conditional height and its functional purpose, and is determined solely by a prescriptive method. Therefore, a relevant scientific task is to investigate the structural parameters of a residential building's facade and their impact on the processes of limiting fire spread over the surface of external wall structures with facade insulation.

Given the above, it can be asserted that uncovering the patterns of fire spread on the surface of external wall structures with polystyrene-based facade insulation and plaster coatings, along with the factors influencing the effectiveness of fire barriers, is a significant scientific and technical task. This

will enable substantial improvements in the fire safety of prefabricated facade insulation systems for residential buildings with combustible insulation.

The purpose of the work is to uncover the patterns of fire spread on the surface of external wall structures with polystyrene-based facade insulation and plaster coatings, and to identify the factors affecting the effectiveness of fire barriers, as a foundation for enhancing the fire safety of residential buildings with facade insulation and combustible insulation.

The main tasks of the research.

1. Perform an analysis of fire hazards and uncover the features of the combustion process of external wall structures with facade insulation and combustible insulation in residential buildings. Examine typical scenarios of fire spread on their surfaces and reveal the mechanism of fire propagation on the surface of facade insulation based on polystyrene foam.

2. Analyze fire protection measures in external wall structures with facade insulation and plaster finishing, which ensure the limitation of fire spread along the facade. Discuss the features of their installation and the structural parameters.

3. Justify the methodology for experimental research based on the analysis of international and national standards, literature, and other sources of information regarding existing methods for full-scale fire testing of prefabricated facade insulation systems with plaster finishes and methods for their assessment.

4. Conduct full-scale fire tests of prefabricated facade insulation systems with plaster finishes on fire spread in accordance with the requirements of DSTU 9072:2021.

5. Perform computer modeling of full-scale fire tests of the external wall structure with facade insulation and plaster finishing on fire spread in the FDS environment and verify the developed model for adequacy by comparing the obtained numerical data with the results of experimental studies.

6. Investigate factors affecting the effectiveness of fireproof cornices in preventing fire spread on the surface of prefabricated facade insulation systems in residential buildings. Perform a complete factorial numerical experiment and obtain a summary table of the maximum temperature values near the facade surface depending on the width of the fireproof cornice and the height of the window inter-floor partition.

The object of research is the process of fire spreading over the surface of the structures of the exterior walls of residential buildings with facade thermal insulation with plaster finishing.

The subject of research is the influence of facade parameters and the size of the fire cornice on the processes of limiting the spread of fire on the surface of the structures of the exterior walls of residential buildings with facade thermal insulation based on expanded polystyrene.

Research methods. The dissertation uses a systematic approach and a number of general scientific and special research methods. The analytical method of research was used to analyze international and national standards, guidelines and technical documents, recommendations, manuals, reference books, test reports and other literary sources, and information from the Internet. Full-scale fire tests of prefabricated facade thermal insulation systems with plaster finishes for fire spread were performed in accordance with the Method for Full-scale Fire Tests of Prefabricated Facade Thermal Insulation Systems with Plaster Finishes and Small Piece Elements for Fire Spread. Numerical modeling of the dynamics of fire development and spread over the surface of a prefabricated facade thermal insulation system using the FDS software, which is based on a system of differential equations of continuous media such as the Navier-Stokes equations in the numerical implementation by the finite difference method and the method of control volumes, the equation of unsteady thermal conductivity in the numerical implementation by the finite difference method. The theory of experiment planning, methods of probability theory and

mathematical statistics were used to process the experimental results and verify the reliability of the results obtained.

The scientific novelty of the dissertation is to reveal the patterns of fire spread over the surface of exterior wall structures with facade insulation based on expanded polystyrene with plaster finishing and the factors that affect the effectiveness of fire barriers.

In view of this, **for the first time:**

the dependence of the safety criterion on not exceeding the critical temperature of 250 °C, which is achieved by the necessary parameters of the facade and fire cornice, namely: the minimum width of the fire cornice is not less than 0.4 m with a window height of 1.0 m; the minimum width of the fire cornice is 0.5 m with a window height of 0.6 m.

Improved:

the methodology for full-scale fire tests of prefabricated facade insulation systems with plaster finishes for fire spread based on new theoretical and experimental data, taking into account the requirements of European, international and national standards.

Further development took place:

application of experimental and computational methods for determining the actual temperature distributions over the surface of the structures of the exterior walls of residential buildings with facade insulation based on expanded polystyrene, taking into account the peculiarities of structural solutions in residential buildings.

The reliability of the scientific positions, conclusions and recommendations is ensured by: the use of reliable initial data obtained from the results of theoretical and experimental studies; high similarity of theoretical results with the results of full-scale fire tests of prefabricated facade insulation systems with combustible insulation for fire spread; use of a modern method of mathematical modeling using the Fire Dynamics Simulator (FDS) software package; identity of the theoretical results of the study with the results of the

The validity of the obtained provisions, results, conclusions and recommendations is confirmed by: the correctness of the application of the research and analytical apparatus tested in scientific practice; comparison of the research results with the data of domestic and foreign experience; experience in the practical implementation of the research results in the practical activities of the civil protection service, in two research papers; publication of research results in domestic professional and foreign scientific journals; discussion of research results at international conferences.

Practical significance of the results. The practical value of the dissertation research is that the scientific results obtained will make it possible to revise the criteria for the effectiveness of limiting the spread of facade fire with their further integration into the fire protection system of buildings and structures. The results of the dissertation research can be used by design institutions to improve the regulatory framework in the field of fire safety in construction.

The improved procedure for conducting tests and evaluating their results for the methodology of full-scale fire tests of prefabricated facade insulation systems with plaster finishing for fire spread is used at the Institute of Public Administration and Research in the Field of Civil Protection, and the results of the dissertation are implemented in the scientific activities of the research and testing center by applying the obtained scientific, methodological and experimental base in the study of fire spread over the surface of structures.

In addition, the results of the dissertation research have been put into practical use by the construction and design organization UDK PROEKT LLC in the design of new civilian facilities, as well as in the development of projects for the reconstruction of such buildings. The object of implementation is recommendations for the development and justification of the effectiveness of structural parameters of fire barriers located along the contour of multi-storey buildings to prevent the spread of fire on the surface of the structures of the

exterior walls of residential buildings with facade insulation and combustible insulation.

In order to improve the efficiency of training specialists for the SES of Ukraine, the results of the dissertation, which are of theoretical and practical importance, have been implemented in the educational process of the Lviv State University of Life Safety. In particular, at the Department of Civil Protection and Mine Action - in the discipline “Preventive Activities in the Field of Civil Protection”, the topic “Ensuring Reliability and Safe Operation of Buildings” for bachelor's degree in specialty 263 “Civil Security”. At the Department of Supervisory and Preventive Activities and Fire Automation - in the discipline “Fire Prevention in Settlements”, topic “Fire Protection Requirements in the Design and Operation of Residential Buildings and Dormitories” for bachelor's degree in specialty 261 “Fire Safety”. The results of the work were used in the lecture courses of these disciplines in the presentation of theoretical provisions on the analysis of the national and international regulatory framework on fire safety requirements for prefabricated systems of facade thermal insulation of external walls of buildings and structures and methods of their evaluation, as well as the study of the impact of fire barriers on preventing the spread of fire through vertical building structures of residential buildings.

The introduction describes the general characteristics of the work, substantiates the relevance of the topic of the dissertation research, reveals the connection of the work with scientific programs, plans and topics, formulates the purpose, objectives, object and subject of the study, reveals the scientific novelty and practical significance of the results obtained, identifies the personal contribution of the applicant, provides data on testing, publications, structure and scope of the work.

In the first chapter, the current state of facade insulation use and its impact on the fire safety of buildings and structures was analyzed. The analysis revealed that while the use of combustible insulation materials for facades is economically beneficial, it poses an increased risk to the life and health of

people during a fire. Therefore, ensuring the fire safety of buildings with thermal insulation and finishing systems for external walls requires thorough research.

Statistical data on fires indicate that on average, 68% of fires in multi-story residential and public buildings involved the spread of fire to upper floors as a result of flame propagation on the facade surface. However, to date, there is virtually no analysis of the consequences of such fires, taking into account the structural features of the most common types of facades.

The features of the processes occurring during the burning of the thermal insulation and finishing system of external walls of residential buildings were analyzed and described. Typical scenarios of fire spread on the surface of external walls with facade insulation that includes a combustible insulator and a plaster coating were presented. The mechanism of fire spread through a window opening along the facade insulation based on polystyrene foam was described.

The results of the literature review enabled the formulation of the goal and objectives for its achievement.

In the second chapter, an analysis of the international and national regulatory framework regarding fire safety requirements for prefabricated external wall insulation systems of buildings and their testing methods was conducted. Most of the fire testing methods for façade systems in European countries involve configurations where the fire scenario simulates the plume of combustion products exiting through an opening in the building's external surface, rising along the façade. The sizes of model fire sources and national testing methods vary significantly.

Fire protection measures in the construction of external walls with façade insulation and plaster finishes, as well as the specifics of their implementation considering the experience of other countries, were analyzed. The types, structural features, purposes, and functions of fire barriers and the framing of window (door) openings made from non-combustible materials, which are installed in the construction of external walls with façade insulation and plaster finishes, were reviewed and analyzed. Emphasis is placed on the significant role

of fire barriers and the framing of window (door) openings with non-combustible mineral wool boards in ensuring the fire safety of buildings and structures. In Ukraine, at the national level, the regulatory documents insufficiently describe (elaborate on) the procedure for installing fire barriers and framing around window and door openings, leading to misinterpretations or neglect of these requirements.

In the third chapter, the parameters of the testing equipment and the procedure for conducting fire tests of prefabricated façade insulation systems with plaster finishes on fire spread were substantiated. The duration of the test, the construction of the building fragment, the model fire source, the experimental equipment, and the methodology of full-scale fire tests of prefabricated façade insulation systems with plaster finishes and small elements on fire spread were justified. The essence of the tests was to determine the extent of damage and the increase in temperature in the prefabricated façade insulation system applied to a fragment of a two-story building, with the first floor subjected to a temperature regime close to standard. An approach was proposed to determine the extended application of the test results of the prefabricated façade insulation system.

In the fourth chapter, the results of full-scale fire tests of the external wall constructions of residential buildings with façade insulation and combustible insulation on fire spread were analyzed. The tests showed that the flame did not spread beyond the direct contact area of the façade insulation with the flame from the fire chamber.

In the fifth chapter, computer modeling of the fire test of the façade insulation system using FDS software was conducted. This provided numerical and graphical data reflecting the process of fire initiation, spread, and development on the surface of the building's façade insulation system. The modeling results reproduced the real test conditions with adequate accuracy, and the comparison of experimental data with numerical calculations confirmed the model's adequacy and the consistency of the results obtained.

The influence of façade parameters and the width of the fire barrier on preventing the spread of fire through external vertical structures was studied using a residential building example. FDS modeling was used to investigate the relationships between the parameters of external enclosing structures and the fire barrier on fire spread limitation processes. The impact of minimum height parameters of the inter-floor window sill in the absence of a fire barrier on fire spread was determined. Dependencies of temperature changes near the façade surface on the width of the fire barrier and the height of the inter-floor window sill were established.

Keywords: fire safety, heat exchange, critical temperature, fire resistance, heat flux, façade insulation, combustibility, heat release, insulating materials, flame spread, mathematical model, computer modeling, fire barrier.

LIST OF PUBLISHED WORKS ON THE THEME OF THE DISSERTATION

Articles in scientific and professional publications of Ukraine

1. Yakovchuk, R., Ballo, Y., Kuzyk, A., **Kagitin, O.**, Kovalchuk, V. (2021). FDS modeling of the fire-preventing eaves effectiveness to prevent the fire spreading on facade of high-rise buildings. *Bulletin of Lviv State University of Life Safety*, 23, pp. 39-45. DOI: <https://doi.org/10.32447/20784643.23.2021.06>
2. Yakovchuk R., **Kagitin O.**, Loik V., Synelnikov O., Halanchenko R., & Vozniak O. (2021). Analysis of factors affecting the spread of fire by the structure of facade thermal insulation with ventilated air layer. *Bulletin of Lviv State University of Life Safety*, 24, pp. 57-65. DOI: <https://doi.org/10.32447/20784643.24.2021.07>
3. Ballo, Y. V., Yakovchuk, R. S., Nizhnyk V. V., **Kagitin, O. I.** (2022). Analysis and systematization of types of facade systems of buildings as a prerequisite for improvement of fire-fighting measures. *Fire Safety*, 40, pp. 5-15. DOI: <https://doi.org/10.32447/20786662.40.2022.01>

4. Ballo, Y., Yakovchuk, R., **Kagitin, O.**, Stylik, I. (2022). Analysis of the main methods of assessing the spread of fire through building facades. *Fire Safety*, 41, pp. 20-30. DOI: <https://doi.org/10.32447/20786662.41.2022.03>
5. **Kagitin, O.**, Veselivskyi, R. (2023). Substantiation of the procedure for testing combined façade thermal insulation systems for fire spread. *Fire Safety*, 43, 63-75. DOI: <https://doi.org/10.32447/20786662.43.2023.08>

Publications in scientific publications included in the Scopus database:

1. Roman Yakovchuk, Andriy Kuzyk, **Olexander Kagitin**, Andriy Ivanusa and Sergiy Yemelyanenko (2021). FDS simulation of fire spreading on façade heat insulating system. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 635 (2021) 012009. Access mode: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/635/1/012009/pdf>
DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/635/1/012009>
2. Ballo, Y., Nizhnyk, V., Veselivskyy, R., **Kagitin, O.** (2023). Influence of the facade slope on fire propagation processes on higher floors. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (10 (125)), 43–52.
DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.288174>
3. **Kagitin, O.**, Veselivskyi, R., Havrys, A., Ballo, Y., Yakovchuk, R., Kovalyshyn, B. (2024). Determining the influence of facade parameters and the width of a fire-proof eaves on preventing the spread of fire through external vertical structures of buildings. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (1 (130)), 6–16.
DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.303640>

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

1. Yakovchuk R. S., Kagitin O. I., Skorobagayko T. M. Modeling of fire test parameters of the structure of the outer wall with facade thermal insulation in the FDS environment. *Emergency situations: safety and protection:*

materials of the X All-Ukrainian scientific and practical conference with international participation. Cherkasy: Cherkasy Institute of Fire Safety named after the Heroes of Chernobyl of the National Center for Civil Defense of Ukraine, 2020. pp. 305-307.

2. Yakovchuk R. S., Ballo Y. V., Kagitin O. I. Numerical modeling of the influence of structural parameters of fire cornices on the spread of fire on the facade of high-rise buildings. *Problems and prospects of ensuring civil protection: materials of the International scientific and practical conference of young scientists*. Kharkiv: NUCPU, 2021. pp. 34-35.

3. Yakovchuk R. S., Ballo Y. V., Kagitin O. I. Measures to improve the fire safety of facade insulation structures with a ventilated air gap. *Science of civil protection as a way of formation of young scientists: materials of the All-Ukrainian scientific and practical conference of cadets, students, adjuncts (graduate students)*. Cherkasy: Cherkasy Institute of Fire Safety named after the Heroes of Chernobyl of the National Center for Civil Defense of Ukraine, 2022. pp. 32-33.

4. Yakovchuk R. S., Ballo Y. V., Kagitin O. I. Basic methods for assessing the spread of fire along building facades. *Problems and prospects for the development of the life safety system: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference of Young Scientists, Cadets and Students*. Lviv: Lviv State University of Life Safety, 2023. pp. 44-47.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	35
РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН ВИКОРИСТАННЯ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНО-ОЗДОБЛЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ ЗОВНІШНІХ СТІН ТА ЇХ ВПЛИВ НА ПОЖЕЖНУ БЕЗПЕКУ БУДІВЕЛЬ	48
1.1. Конструкція зовнішніх стін із фасадною теплоізоляцією як фактор підвищеної пожежної небезпеки.....	48
1.2. Статистика пожеж у будинках і спорудах із застосуванням систем фасадної теплоізоляції.....	65
1.3. Механізм поширення пожежі поверхнею конструкцій зовнішніх стін із фасадною теплоізоляцією з горючим утеплювачем та опорядженням штукатуркою	74
1.4. Висновки до розділу	82
РОЗДІЛ 2. АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВИМОГ ПОЖЕЖНОЇ БЕЗПЕКИ ЗБІРНИХ СИСТЕМ ФАСАДНОЇ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЇ ЗОВНІШНІХ СТІН БУДИНКІВ І СПОРУД ТА МЕТОДІВ ЇХ ОЦІНЮВАННЯ	84
2.1 Аналіз національної нормативної бази щодо вимог пожежної безпеки до збірних систем фасадної теплоізоляції та методів їх оцінювання.....	84
2.2 Аналіз протипожежних заходів у конструкціях зовнішніх стін із фасадною теплоізоляцією.....	97
2.3 Аналіз європейських та міжнародних вимог пожежної безпеки збірних систем фасадної теплоізоляції зовнішніх стін будинків і споруд та методів їх оцінювання.....	111
2.4. Висновки до розділу	121
РОЗДІЛ 3. МЕТОДИКА ТА ОБЛАДНАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ЗБІРНИХ СИСТЕМ ФАСАДНОЇ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЇ НА ПОШИРЕННЯ ВОГНЮ.....	123
3.1 Обґрунтування параметрів випробувального обладнання і	

процедури проведення випробувань збірних систем фасадної теплоізоляції з опорядженням штукатурками на поширення вогню.....	123
3.2 Експериментальні дослідження температурного режиму у вогневій камері фрагменту будинку при різних умовах навколишнього середовища.....	126
3.2.1 Конструкція фрагмента будинку та модельного вогнища.....	126
3.2.2 Засоби вимірювальної техніки.....	130
3.2.3 Вимірювання температури у вогневій камері.....	132
3.2.4 Вимірювання температури середовища біля віконного прорізу...	133
3.2.5 Вимірювання температури усередині збірної системи фасадної теплоізоляції.....	134
3.3 Підготовка та проведення випробування.....	136
3.4 Оброблення експериментальних даних температурних вимірювань.....	138
3.5. Висновки до розділу	142
РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ НАТУРНИХ ВОГНЕВИХ ВИПРОБУВАНЬ КОНСТРУКЦІЙ ЗОВНІШНІХ СТІН ЖИТЛОВИХ БУДИНКІВ ІЗ ФАСАДНОЮ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЄЮ ТА ГОРЮЧИМ УТЕПЛЮВАЧЕМ НА ПОШИРЕННЯ ВОГНЮ.....	143
4.1 Підготовка до випробувань на поширення вогню збірної системи фасадної теплоізоляції з горючим утеплювачем середньої товщини 150 мм.....	143
4.2 Спостереження та результати випробувань на поширення вогню збірної системи фасадної теплоізоляції з горючим утеплювачем середньої товщини 150 мм.....	148
4.3 Результати температурного розподілу у вогневій камері, біля віконного прорізу, біля зовнішньої поверхні та усередині збірної системи фасадної теплоізоляції під час випробувань.....	155
4.4. Висновки до розділу	162
РОЗДІЛ 5. ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЗОВНІШНІХ	

ОГОРОДЖУЮЧИХ КОНСТРУКЦІЙ ФАСАДУ БУДІВЛІ НА ЗАПОБІГАННЯ ПОШИРЕННЯ ПОЖЕЖІ У СЕРЕДОВИЩІ FIRE DYNAMICS SIMULATOR (FDS).....	164
5.1 Основи моделювання динаміки пожеж у FDS.....	164
5.1.1. Основні принципи, покладені в основу FDS, та задачі, які вирішують з її допомогою.....	164
5.1.2. Основи моделювання у FDS.....	167
5.1.3 Результати моделювання, їх обробка і візуалізація.....	172
5.2 Результати комп'ютерного моделювання поширення пожежі поверхнею збірних систем фасадної теплоізоляції у середовищі FDS.....	175
5.3 Дослідження чинників, які впливають на ефективність застосування протипожежних карнизів для запобігання поширення пожежі по фасадам будівель	186
5.4 Дослідження впливу параметрів фасаду та ширини протипожежного карнизу на поширення пожежі.....	194
5.5 Дослідження впливу мінімальних параметрів висоти міжповерхового віконного простінку за відсутності протипожежного карнизу.....	201
5.6. Дослідження залежності зміни температури від ширини протипожежного карнизу та висоти міжповерхового простінку.....	202
5.7. Висновки до розділу	208
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	210
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	214
ДОДАТОК А Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації.....	228
ДОДАТОК Б Акти впровадження результатів дисертації.....	232

ВСТУП

Актуальність теми. В теперішній час у практиці будівництва для зменшення тепловтрат використовують різні теплоізоляційні матеріали, такі як пінополістирол, мінеральна вата, пінополіуретан, скловата, перліт тощо. Сучасні теплоізоляційні матеріали мають широкий діапазон застосування, за допомогою них виконують утеплення покрівель, зовнішніх, внутрішніх та підвальних стін, перекриття та підлоги. Одним із найбільш розповсюджених застосувань теплоізоляційних матеріалів є утеплення фасадів будинків. Конструкцією зовнішніх стін із фасадною теплоізоляцією є конструкція, яка складається з несучої частини стіни та комплекту теплової ізоляції і призначена для забезпечення нормативних значень теплотехнічних показників стінових конструкцій, захисту будівель і споруд від впливу навколишнього середовища, забезпечення нормативного мікроклімату будівель і споруд та надання фасадам будівель і споруд привабливого естетичного вигляду.

Крім позитивних переваг, роботи з термомодернізації можуть збільшувати пожежну навантагу будинків, бо застосування горючого теплоізоляційного матеріалу впливатиме на пожежну небезпеку будівель із фасадною теплоізоляцією. Горіння полімерів — це складне фізико-хімічне явище, що включає процеси тепло- та масообміну, хімічну кінетику реакцій як у конденсованих, так і в газовій фазах, а також інші фактори. Широкий асортимент полімерних матеріалів за хімічною будовою та складом, їх багатокомпонентність, поєднання з іншими будівельними матеріалами та широке застосування у будівництві зумовлюють специфічні умови виникнення, розвитку та гасіння пожеж фасадів будинків. У будівельній галузі близько 80% теплоізоляційного матеріалу становить пінополістирол, який має значні недоліки з точки зору пожежної небезпеки: він є горючим матеріалом, під час пожежі виділяє токсичні продукти, а також значно впливає на вогнестійкість будівельних конструкцій із фасадною теплоізоляцією [1].

Розвиток наукових положень пожежної безпеки полімерних матеріалів з метою розробки більш безпечних і стійких до вогню матеріалів базується на фундаментальних теоретичних та експериментальних дослідженнях J.W. Gilman, C.L. Jackson, M. Lewin, J. Ebdon, S. Billmeyer, I. Stengel, D. Duffey, J. Anderson, R. Jansson та інші. В останні роки значних успіхів досягнуто в галузі математичного моделювання процесів, що характеризують розвиток пожеж в будівлях різного призначення. Ці досягнення пов'язані перш за все з роботами Томаса Ф., Драздейла Д., Квінтієрі Д., Б. Г. Демчини, Т. М. Шналя, С. В. Поздєєва, В. В. Ніжника, О. В. Некори та інших.

В Україні проблемами пожежної небезпеки полімерних теплоізоляційних матеріалів та збірних систем фасадної теплоізоляції займалися Р. С. Яковчук, А. Д. Кузик, Я. В. Балло, Т. М. Скоробогатько, Ю. Л. Фещук, А. В. Довбиш, С. В. Новак, Р. В. Климась, Якименко О.П., Третьякова О.В., В. Г. Дагіль та інші.

Приклади пожеж, що поширюються по фасадних системах будівель, вказують на їх особливу небезпеку. Ця небезпека безпосередньо залежить від конструктивних особливостей конкретної будівлі, типу використаного теплоізоляційного матеріалу та параметрів самої пожежі. Найчастішими причинами займання конструкцій зовнішніх стін із фасадною теплоізоляцією та штукатурним покриттям є перекидання вогню з віконного прорізу внаслідок інтенсивної пожежі всередині приміщення. В таких умовах конвекційні потоки тепла можуть спричинити займання горючого облицювання зовнішніх стін. На процес поширення вогню фасадними системами впливає низка факторів. Серед них можна виділити наступні: зовнішні умови (теплові потоки з віконних прорізів, температурні режими горіння теплоізоляційного матеріалу); пожежно-технічні характеристики матеріалу теплоізоляції (температура займання, швидкість поширення вогню по матеріалу, температура самозаймання та інші); архітектурні та об'ємно-планувальні характеристики будівлі [2].

Для запобігання поширенню пожежі в будівлях використовуються автоматичні системи протипожежного захисту, такі як автоматичні системи пожежогасіння, системи пожежної сигналізації та протидимного захисту, а також протипожежні перешкоди, зони, відсіки, тамбур-шлюзи, пояси, розриви і т. д. Використання протипожежних поясів з негорючих мінераловатних плит у конструкціях зовнішніх стін із фасадною теплоізоляцією дозволяє обмежити поширення пожежі або зменшити швидкість поширення вогню по поверхні фасаду. Такі протипожежні заходи будуть ефективними під час пожежі лише за умови їх правильного технічного виконання. Використання горючих матеріалів для цих цілей, а також помилки під час проектування та монтажу значно підвищують рівень пожежної небезпеки будівель з фасадною теплоізоляцією. У національних нормативних документах процедура облаштування протипожежних поясів та обрамлення віконних та дверних прорізів недостатньо детально описана технічно. Часто відбуваються ситуації, коли вимоги нормативних документів стосовно улаштування систем фасадної теплоізоляції неправильно тлумачаться або взагалі ігноруються. Це може статися через брак досвіду у виконавців, що виконують монтажні роботи або через навмисне нехтування правилами пожежної безпеки задля економії коштів під час будівництва [3].

Обмеження поширення пожежі є однією з основних вимог як вітчизняних, так і зарубіжних будівельних норм [4-7]. Однією з актуальних проблем пожежної безпеки є обмеження поширення вогню по фасадах будівель та оцінка ефективності заходів для його стримування. На сьогоднішній день у країнах Європи, Азії та США немає єдиних підходів до методів і критеріїв, які визначають досягнення умов обмеження поширення пожежі по поверхні зовнішніх вертикальних будівельних конструкцій [8].

Застосування протипожежних карнизів в якості фасадної протипожежної перешкоди є одним із базових заходів передбачених

державними будівельними нормами ДБН В.1.1-7:2016 “Пожежна безпека об’єктів будівництва” та ДБН В.2.2-41:2019 “Висотні будівлі. Основні положення”. Слід відзначити, що застосування протипожежних карнизів можливо не тільки для висотного будівництва, але і для багатопверхових будівель та будівель підвищеної поверховості, які розділені на декілька вертикальних протипожежних відсіків. Як приклад, такі випадки притаманні для житлових, громадських та адміністративних будівель у складі яких можливо розміщення вбудованих приміщень іншого функціонального призначення (магазинів, кафе, закладів надання соціальних послуг тощо).

Єдиний метод, який регламентує встановлення протипожежного карнизу згідно будівельних норм та стандартів, є розпорядчим. Тобто, існує лише опис даного об’єкту нормування у будівництві (параметри конструкції, вимоги до матеріалів, тощо), що не передбачає альтернативи даного рішення. Для забезпечення вимоги щодо обмеження поширення фасадної пожежі відсутній опис критерію, який роз’яснює цілі нормативного положення.

Фактично єдиною вимогою щодо параметрів протипожежного карнизу є його ширина, що виступає за межі фасаду, а також клас вогнестійкості не менше EI 90. Даний підхід не дозволяє оцінювати ефективність запропонованого заходу для того чи іншого типу фасаду, а також враховувати його фактичну пожежну небезпеку. Разом із тим, параметри фасадних систем та зовнішніх огорожувальних конструкцій можуть значно впливати на процеси поширення пожежі, як в частині її обмеження так і навпаки – бути причиною її швидкого поширення на вище розташовані поверхи та протипожежні відсіки.

Ключовою проблематикою облаштування протипожежних карнизів є те, що в теперішніх будівельних нормах, незалежно від параметрів віконного міжповерхового простінку, розмір карнизу залишається незмінним. Він становить 0,3 м або 0,75 м, в залежності від умовної висоти

будинку та його функціонального призначення, та приймається виключно розпорядчим методом нормування. Таким чином, актуальними науковим завданням є дослідження конструктивних параметрів фасаду житлової будівлі та їх вплив на процеси обмеження поширення вогню поверхнею конструкцій зовнішніх стін із фасадною теплоізоляцією.

З огляду на вищезазначене, можна стверджувати, що розкриття закономірностей поширення вогню поверхнею конструкцій зовнішніх стін із фасадною теплоізоляцією на основі пінополістиролу з опорядженням штукатурками та чинників, які впливають на ефективність застосування протипожежних перешкод, як підґрунтя для підвищення пожежної безпеки житлових будинків із фасадною теплоізоляцією та горючим утеплювачем є актуальним науково-технічним завданням, що дасть змогу істотно підвищити пожежну безпеку збірних систем фасадної теплоізоляції житлових будинків.

Зв'язок роботи із науковими програмами, планами та темами. Дисертаційна робота підготовлена у межах виконання розпорядження Кабінету Міністрів України від 19.08.2015 № 844-р «Про схвалення Стратегії розвитку системи технічного регулювання на період до 2020 року» та відповідно до розділу 2 п. 8 «Плану наукової та науково-технічної діяльності ДСНС України на 2021 рік»; Концепції наукової діяльності Львівського державного університету безпеки життєдіяльності на 2020-2025 роки; розділу 2 Плану наукової і науково-технічної діяльності Львівського державного університету безпеки життєдіяльності на 2021 рік. Дисертаційне дослідження є складником технічного завдання науково-дослідної роботи у Львівському державному університеті безпеки життєдіяльності “Обґрунтування адекватності спрощених методів випробування на базі науково-дослідної лабораторії пожежної безпеки”, (державний реєстраційний номер: 0122U000104) та “Підвищення ефективності протипожежного захисту будівельних конструкцій”

(державний реєстраційний номер 0122U202032), де здобув був виконавцем.

Метою роботи є розкриття закономірностей поширення вогню поверхнею конструкцій зовнішніх стін із фасадною теплоізоляцією на основі пінополістиролу з опорядженням штукатурками та чинників, які впливають на ефективність застосування протипожежних перешкод, як підґрунтя для підвищення пожежної безпеки житлових будинків із фасадною теплоізоляцією та горючим утеплювачем.

Задачі дослідження:

1. Виконати аналіз пожежної небезпеки та розкрити особливості процесу горіння конструкцій зовнішніх стін із фасадною теплоізоляцією та горючим утеплювачем житлових будинків, розглянути типові сценарії розповсюдження вогню їх поверхнею; розкрити механізм поширення вогню поверхнею фасадної теплоізоляції на основі пінополістиролу.

2. Виконати аналіз протипожежних заходів у конструкціях зовнішніх стін із фасадною теплоізоляцією та опорядженням штукатуркою, які забезпечують обмеження поширення вогню по фасаду, особливостей їх облаштування та конструктивні параметри.

3. Обґрунтувати методику експериментальних досліджень на основі аналізу міжнародних та національних стандартів, літературних та інших джерел інформації стосовно існуючих методів натурних випробувань пожежної небезпеки збірних систем фасадної теплоізоляції будинків з опорядженням штукатурками та методів її оцінювання.

4. Провести натурні вогневі випробування збірних систем фасадної теплоізоляції з опорядженням штукатурками на поширення вогню у відповідності до вимог ДСТУ 9072:2021.

5. Виконати комп'ютерне моделювання натурних вогневих випробувань конструкції зовнішньої стіни із фасадною теплоізоляцією з опорядженням штукатуркою на поширення вогню в середовищі FDS та перевірити розроблену модель на адекватність шляхом порівняння

отриманих чисельних даних з результатами експериментальних досліджень.

6. Дослідити чинники, які впливають на ефективність протипожежних карнизів для запобігання поширення пожежі поверхнею збірних систем фасадної теплоізоляції житлових будинків. Виконати повний факторний числовий експеримент та отримати таблицю зі зведеними даними щодо максимального значення температури біля поверхні фасаду в залежності від ширини протипожежного карнизу та висоти віконного міжповерхового простінку.

Об'єкт дослідження – процес поширення вогню поверхнею конструкцій зовнішніх стін житлових будинків із фасадною теплоізоляцією з опорядженням штукатурками.

Предмет дослідження – вплив параметрів фасаду та розмірів протипожежного карнизу на процеси обмеження поширення вогню поверхнею конструкцій зовнішніх стін житлових будинків із фасадною теплоізоляцією на основі пінополістиролу.

Методи дослідження. У дисертаційній роботі використано системний підхід та низку загальнонаукових та спеціальних методів досліджень. Аналітичний метод досліджень використовували для аналізу міжнародних та національних стандартів, керівних та технічних документів, рекомендацій, посібників, довідників, протоколів випробувань та інших літературних джерел, інформації мережі Internet. Натурні вогневі випробування збірних систем фасадної теплоізоляції з опорядженням штукатурками на поширення вогню виконували згідно Методу натурних вогневих випробувань збірних систем фасадної теплоізоляції з опорядженням штукатурками та дрібноштучними елементами на поширення вогню. Чисельне моделювання динаміки розвитку та поширення пожежі поверхнею збірної системи фасадної теплоізоляції за допомогою програмного забезпечення FDS, в основі якого закладена система диференціальних рівнянь неперервних середовищ типу рівнянь

Нав'є-Стокса у числовій реалізації за методом кінцевих різниць і методу контрольних об'ємів, рівняння нестационарної теплопровідності у числовій реалізації за методом кінцевих різниць. Теорія планування експерименту, методи теорії імовірності та математичної статистики були використані під час обробки результатів експериментів та перевірки достовірності отриманих результатів.

Наукова новизна дисертаційної роботи полягає у розкритті закономірностей поширення вогню поверхнею конструкцій зовнішніх стін із фасадною теплоізоляцією на основі пінополістиролу з опорядженням штукатурками та чинників, які впливають на ефективність застосування протипожежних перешкод.

З огляду на це, **вперше:**

встановлено залежність критерію безпеки щодо не перевищення критичної температури у 250 °С, який досягається необхідними параметрами фасаду та протипожежного карнизу, а саме: мінімальної ширини протипожежного карнизу не менше 0,4 м при висоті віконного міжповерхового простінку 1,0 м; мінімальної ширини протипожежного карнизу 0,5 м при висоті віконного простінку 0,6 м.

Удосконалено:

методику натурних вогневих випробувань збірних систем фасадної теплоізоляції з опорядженням штукатурками на поширення вогню на основі нових теоретичних та експериментальних даних з урахуванням вимог європейських, міжнародних і національних стандартів.

Набуло подальшого розвитку:

застосування експериментальних та обчислювальних методик для визначення реальних розподілів температури поверхнею конструкцій зовнішніх стін житлових будинків із фасадною теплоізоляцією на основі пінополістиролу з урахуванням особливостей конструктивних рішень в житлових будівлях.

Достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій забезпечується: використанням достовірних вихідних даних, що отримані за результатами теоретичних і експериментальних досліджень; високою схожістю отриманих теоретичних результатів з результатами натурних вогневих випробувань збірних систем фасадної теплоізоляції з горючим утеплювачем на поширення вогню; використанням сучасного методу математичного моделювання за допомогою програмного комплексу Fire Dynamics Simulator (FDS); тотожністю одержаних теоретичних результатів дослідження з результатами досліджень інших авторів; підтвердженням адекватності запропонованих моделей та одержаними результатами експериментальних досліджень разом із статистичною обробкою їх результатів.

Обґрунтованість одержаних положень, результатів, висновків і рекомендацій підтверджується: коректністю застосування апробованого в науковій практиці дослідного й аналітичного апарату; порівнянням результатів дослідження з даними вітчизняного та іноземного досвіду; досвідом практичної реалізації результатів дослідження в практичній діяльності служби цивільного захисту, у двох науково-дослідних роботах; публікацією результатів дослідження у вітчизняних фахових та іноземних наукових виданнях; обговоренням результатів дослідження на міжнародних та всеукраїнських науково-практичних конференціях.

Практичне значення отриманих результатів. Практична цінність дисертаційних досліджень полягає у тому, що отримані наукові результати дадуть змогу переглянути критерії ефективності обмеження поширення фасадної пожежі з їх подальшою інтеграцією в систему протипожежного захисту будівель та споруд. Результати дисертаційного дослідження можуть бути використаними проєктними установами для удосконалення нормативної бази у галузі пожежної безпеки будівництва.

Удосконалена процедура проведення випробувань та оцінювання їх результатів для методики натурних вогневих випробувань збірних систем

фасадної теплоізоляції з опорядженням штукатурками на поширення вогню використовується в Інституті державного управління та наукових досліджень у сфері цивільного захисту, також результати дисертаційної роботи впроваджено у наукову діяльність науково-випробувального центру шляхом застосування отриманої науково-методичної та експериментальної бази під час дослідження процесів поширення пожежі поверхнею конструкцій зовнішніх стін житлових будинків із фасадною теплоізоляцією та горючим утеплювачем.

Крім того, результати дисертаційного дослідження впроваджено у практичне використання будівельно-проектною організацією ТзОВ «ЮДК ПРОЕКТ» під час проектування нових цивільних об'єктів, а також під час розробки проектів з реконструкції таких будівель. Об'єктом впровадження є рекомендації щодо розробки та обґрунтування ефективності конструктивних параметрів протипожежних перешкод, які розташовуються по контуру багатоповерхових будинків для запобігання розповсюдження вогню поверхнею конструкцій зовнішніх стін житлових будинків із фасадною теплоізоляцією та горючим утеплювачем.

З метою підвищення ефективності підготовки фахівців для ДСНС України результати дисертаційної роботи, які мають теоретичне та практичне значення, впроваджено в освітній процес Львівського державного університету безпеки життєдіяльності. Зокрема, на кафедрі цивільного захисту та протимінної діяльності – у навчальну дисципліну «Профілактична діяльність у сфері цивільного захисту», тема «Забезпечення надійності та безпечної експлуатації будівель» підготовки бакалавра зі спеціальності 263 «Цивільна безпека». На кафедрі наглядово-профілактичної діяльності та пожежної автоматики – у навчальну дисципліну «Пожежна профілактика в населених пунктах», тема «Протипожежні вимоги при проектуванні та експлуатації житлових будівель та гуртожитків» підготовки бакалавра зі спеціальності 261 «Пожежна безпека». Результати роботи використані в лекційних курсах

зазначених навчальних дисциплін при викладенні теоретичних положень щодо аналізу національної та міжнародної нормативної бази щодо вимог пожежної безпеки до збірних систем фасадної теплоізоляції зовнішніх стін будинків і споруд та методів їх оцінювання, а також дослідження впливу протипожежних перешкод на запобігання поширення пожежі вертикальними будівельними конструкціями житлових будівель.

Особистий внесок здобувача Основні теоретичні, розрахункові та експериментальні результати отримано здобувачем самостійно. Наукові положення, що виносяться на захист, та висновки дисертаційної роботи належать автору.

У роботах, які опубліковано у співавторстві:

- в науковій праці «FDS simulation of fire spreading on façade heat insulating system» здобувач виконав комп'ютерне моделювання динаміки пожежі за допомогою чисельного інструмента FDS, а отримані чисельні результати порівняв із експериментальними даними для перевірки можливості використання програмного забезпечення щодо відтворення реальних умов пожежі у житлових будинках [9];

- в науковій праці «FDS моделювання ефективності протипожежних карнизів на запобігання поширенню пожежі фасадними конструкціями висотних будівель» здобувач виконав дослідження ефективності відведення теплового потоку від фасаду та ефективності протипожежних фасадних карнизів на запобігання поширенню пожежі вертикальними будівельними конструкціями висотних будівель в середовищі FDS [10];

- в науковій праці «Аналіз чинників, які впливають на поширення вогню конструкцією фасадної теплоізоляції з вентильованим повітряним прошарком» здобувач узагальнив причини та наслідки займання навісних вентильованих фасадів на прикладах резонансних пожеж минулих років, а також визначив фактори, які впливають на руйнування конструктивних елементів та поширення пожежі поверхнею фасадних систем будівлі [11];

- в науковій праці «Аналіз та систематизація типів фасадних систем будівель як передумова удосконалення протипожежних заходів» здобувач визначив основні переваги та недоліки для найбільш поширених типів фасадних систем з точки зору можливості потенційного запобігання поширенню пожежі по зовнішніх вертикальних конструкціях [12];

- в науковій праці «Аналіз основних методів оцінювання поширення пожежі по фасадах будівель» здобувач запропонував конструктивні рішення, які дадуть можливість оцінити забезпечення обмеження поширення пожежі по фасадах будівель при застосування вогневих перешкоджувачів [8];

- в науковій праці «Обґрунтування процедури проведення випробувань збірних систем фасадної теплоізоляції на поширення вогню» здобувач обґрунтував параметри випробувального обладнання для проведення випробувань збірних систем фасадної теплоізоляції з опорядженням штукатурками на поширення вогню [13];

- в науковій праці «Influence of the facade slope on fire propagation processes on higher floors» здобувач виконав дослідження впливу кутів нахилу фасаду на процеси розповсюдження пожежі та характер температурних розподілів на поверхні фасаду [14];

- в науковій праці «Determining the influence of facade parameters and the width of a fire-proof eaves on preventing the spread of fire through external vertical structures of buildings» здобувач визначив вплив мінімальних параметрів висоти міжповерхового віконного простінку за відсутності протипожежного карнизу на поширення пожежі та встановив залежності зміни температури біля поверхні фасаду від ширини протипожежного карнизу та висоти віконного міжповерхового простінку [15].

Апробація матеріалів дисертації. Основні положення та результати дисертації доповідались, обговорювались та отримали схвалення на науково-практичних конференціях: X Всеукраїнська науково-практична конференція з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та

захист» (м. Черкаси, ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2020 р.); Міжнародна науково-практична конференція молодих учених «Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту» (м. Харків, НУЦЗ України, 2021 р.); Всеукраїнська науково-практична конференція курсантів, студентів, ад'юнктів (аспірантів) «Наука про цивільний захист як шлях становлення молодих вчених» (м. Черкаси, ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2022 р.); XVIII Міжнародна науково-практична конференція молодих вчених, курсантів та студентів «Проблеми та перспективи розвитку системи безпеки життєдіяльності» (м. Львів, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, 2023 р.).

Публікації. Результати досліджень, що висвітлено у дисертації, опубліковано у 12 наукових працях: 5 статей опубліковано у наукових фахових виданнях України, 3 статті опубліковано у наукових виданнях, що індексується в наукометричній базі Scopus, 4 тезах доповідей на міжнародних та всеукраїнських науково-практичних конференціях.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з анотації, змісту, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних літературних джерел, додатків. Загальний обсяг роботи становить 235 сторінок друкованого тексту, з них основного тексту 214 сторінок, 70 рисунків, 34 таблиці, список використаних джерел складає 131 найменування та займає 14 сторінок, а також 2 додатки на 8 сторінках.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ВИКОРИСТАННЯ ФАСАДНОЇ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЇ ТА ЇЇ ВПЛИВ НА ПОЖЕЖНУ БЕЗПЕКУ БУДІВЕЛЬ

1.1 Конструкція зовнішніх стін із фасадною теплоізоляцією як фактор підвищеної пожежної небезпеки

Зараз економія енергії вважається однією з ключових національних пріоритетів. Одним із способів зменшення витрат енергоресурсів у сфері житлово-комунального господарства є зниження втрат тепла через зовнішні обмежувальні структури будинків. Цього можна досягти за допомогою новітніх технологій з підвищеними теплоізоляційними характеристиками та застосуванням систем утеплення. Роботи з утеплення можуть проводитися як під час будівництва нових будівель, так і під час реконструкції або капітального ремонту вже існуючих будівель [16, 17].

На сьогодні в Україні близько 75 тисяч житлових будинків загальною площею понад 3500 мільйонів квадратних метрів потребують утеплення зовнішніх стін. Крім того, були введені нові норми, спрямовані на зниження втрат тепла через стіни будинків у 2,5-3 рази [18].

Сучасні матеріали для теплоізоляції використовуються не лише для утеплення зовнішніх, але й внутрішніх стін, підвалів, дахів, перекриттів та підлог.

Облаштування будівель та споруд конструкціями зовнішніх стін із фасадною теплоізоляцією є досить поширеним та популярним будівельним рішенням не лише в нашій державі, але й за кордоном. На даний час існує велика кількість різноманітних систем утеплення фасадів будинків та теплоізоляційних матеріалів, які використовуються в цих системах – пінополістирол, мінеральна вата, пінополіуретан, скловата, перліт тощо. Вони мають широкий діапазон застосування, за допомогою них виконують утеплення покрівель, зовнішніх, внутрішніх та підвальних стін, перекриття та підлоги [2].

Енергоефективні будівлі та споруди на сьогодні є поєднанням архітектурно-будівельних, конструкторських, інженерних рішень, які спрямовані на зниження їх енергоспоживання без втрати їх надійності, довговічності та комфорту. Сучасні вимоги до таких будівель передбачають застосування в будівництві інноваційних рішень, ефективних теплоізоляційних матеріалів, енергоощадних технологій опалення та освітлення приміщень тощо [2].

Конструкція зовнішніх стін із фасадною теплоізоляцією – це конструкція, що включає несучу частину стіни та комплект теплової ізоляції, яка призначена для забезпечення нормативних значень теплотехнічних показників стінових конструкцій, захисту будівель і споруд від впливу навколишнього середовища, забезпечення нормативного мікроклімату будівель і споруд та надання фасадам будівель і споруд привабливого естетичного вигляду [19].

Найбільш поширеним та енергоефективним типом фасадних систем, особливо під час реконструкції будівель є влаштування так званого «мокрого фасаду», монтаж якого не передбачає підсилення несучих стін фасаду. Технологія влаштування «мокрого фасаду» передбачає створення зовні багат шарового ізолюючого покриття. Кріплення шарів покриття до стіни відбувається шляхом нанесення спеціальних клеєвих розчинів, мастики та штукатурки, які розчиняються у звичайній воді, що обумовлює відповідну назву. Технологія передбачає дотримання чіткого порядку нанесення шарів: ґрунтовка, клеєва суміш, теплоізоляційні плити, армована сітка, штукатурка та фарбування [12].

На рис. 1.1 наведено приклад влаштування «мокрого фасаду» та специфікація шарів фасадної системи.

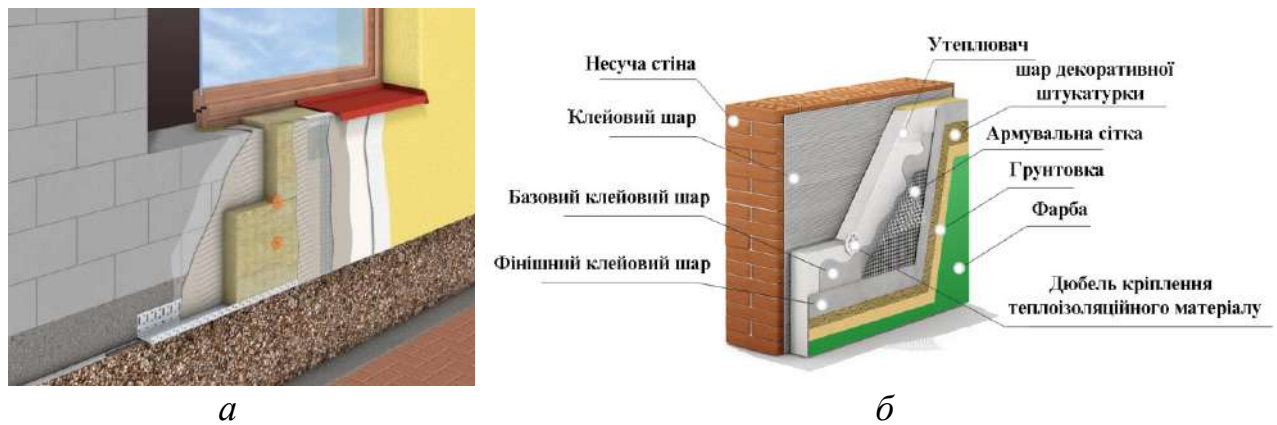


Рисунок 1.1 – Загальний вигляд (а) та специфікація (б) конструктивних елементів фасадної системи «мокрого типу» [12]

Пожежна небезпека цього типу фасадних систем полягає у можливості застосування утеплювача, що не відповідає вимогам пожежної безпеки за показниками горючості, поширення полум'я, займистості тощо для матеріалів, зокрема згідно з нормами [20-22]. Окрім цього, використання неякісних кріпильних елементів та порушення технології монтажу може спричинити відшарування фрагментів фасадних систем та створювати «повітряні кишені» під шаром конструкції фасаду, що негативно впливає на пожежну безпеку.

Серед конструктивних переваг «мокрого фасаду» слід відзначити наявність додаткового теплоізоляційного шару покриття, яке при забезпеченні належної технології нанесення забезпечує додаткову термоізолювальну та вогнестійку здатність зовнішніх вертикальних огорожувальних конструкцій [12].

До «сухих фасадів» відносяться фасадні системи, які монтуються без використання багатошарових клейових та інших будівельних розчинів, а більшість елементів фасаду кріпиться за допомогою механічних кріпильних засобів, а саме: дюбелів, анкерів, металопрофілів, саморізів тощо. Наприклад, сухим можна вважати сайдинговий фасад або навісний вентильований фасад виконаний із: алюмінієвих касет, металопрофілів, керамогранітних, керамічних, клінкерних плит, композитних листів або штучного чи природного каменю [12].

На рис. 1.2 наведено приклад «сухого фасаду» та його конструктивне виконання.



Рисунок 1.2 – Приклад «сухого фасаду» із навісними елементами [12]

Цей тип фасадних систем є одним із потенційно пожежонебезпечних, через наявність повітряного прошарку, можливість використання горючих матеріалів, а саме пластику, вінілу, інших штучних матеріалів, які можуть візуально імітувати натуральний камінь або плитку, але мати горючі властивості [11]. Окрім цього, слід розуміти, що під час пожежі температура на поверхні фасаду залежно від пожежного навантаження всередині будівлі може становити в межах 800-1200 °С, при цьому температура плавлення алюмінію або алюмінійвмісних елементів кріплення навісного фасаду починається від 650 °С [23], що фактично гарантує руйнування фасадної системи під час пожежі. Тобто, використання негорючих оздоблювальних будівельних матеріалів, або матеріалів з групою горючості Г1 не може гарантувати цілісність «сухого фасаду» під час пожежі при використанні металопрофілів із матеріалів з низьким термічним опором.

Вентильований фасад являє собою конструкцію, яка складається із каркаса, що кріпиться до стіни, шару теплоізоляції та облицювальних панелей (опоряджувального захисного шару) (рис. 1.3). При цьому між

облицювальними панелями та утеплювачем передбачається повітряний прошарок [19].

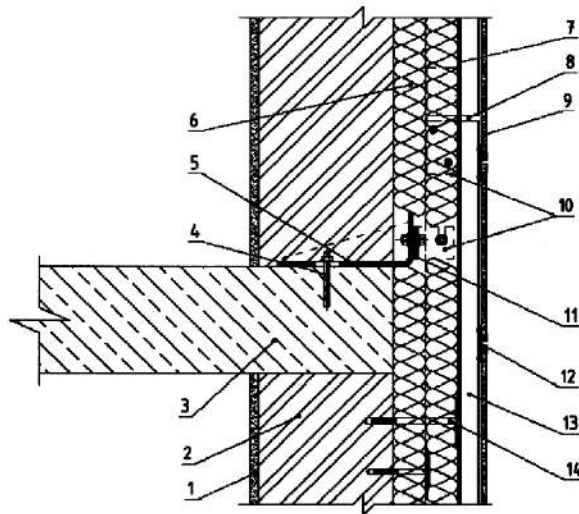


Рисунок 1.3 – Конструктивна схема збірної системи із стояковим кріпленням зовнішнього опоряджувального захисного шару [19]:

1 – внутрішня штукатурка; 2 – несуча частина стіни; 3 – залізобетонна плита перекриття; 4 – анкер клиновий; 5 – кронштейн; 6 – шар теплової ізоляції; 7 – повітрозахисна мембранна плівка; 8 – повітряний вентиляований прошарок; 9 – індустріальні личкувальні елементи (керамічні плити); 10 – з'єднувальні елементи; 11 – прокладка; 12 – клямер; 13 – стояк; 14 – елемент механічного кріплення утеплювача

Забезпечення необхідної міцності та стійкості навісних вентиляованих фасадних систем (НВФС) досягається елементами несучого каркаса. Надійність конструкцій каркаса визначається типом облицювальних елементів, що застосовуються, їх геометричними розмірами, масою і способом кріплення. Найбільш надійними для цих систем є сталеві каркаси. Використання у фасадних системах алюмінієвих сплавів з вищою температурою плавлення призводить до суттєвого підвищення їх пожежної небезпеки та обмеження сфери їх застосування. Під час пожеж конструктивні елементи у вигляді тонколистових профілів можуть деформуватися, а цілісність оздоблювально-захисного шару може бути порушена [11].

На процес розвитку та поширення пожежі конструкцією НВФС впливатимуть такі чинники: потужність теплового випромінювання, вид та кількість горючого облицювального матеріалу, дія зовнішніх умов (сила та напрямок вітру, наявність конвективного потоку тощо). На формування вітрових потоків, які спрямовані вздовж поверхні фасаду будівлі, значно впливає природна конвекція. Це явище виникає через градієнт температур навколишнього середовища і поверхні фасаду, який нагрівається сонячним випромінюванням, внаслідок чого з'являється конвективний тепловий потік, спрямований вгору будівлі. Він сприятиме не лише розповсюдженню вогню на великі площі фасадної системи, але й впливатиме на висоту та температуру факела полум'я [11].

Вентильований прошарок створює додаткову тягу та зумовлює поширення пожежі всередині фасадної конструкції. Наявність такого прошарку шириною до 10-15 см створює потужний повітряний потік і сприяє швидкому поширенню пожежі не лише всередині НВФС, але й може бути причиною для поширення пожежі у внутрішні приміщення будівлі. Під час пожежі під впливом високих температур будуть руйнуватися несучі та кріпильні елементи НВФС, внаслідок чого відбудеться обвалення облицювальних конструкцій [11]. Окремі елементи навісного фасаду після падіння можуть утворювати додаткові осередки займання, що призводить до додаткових матеріальних збитків та можливого травмування людей.

Для успішної ліквідації пожеж у будівлях з навісними вентильованими фасадними системами необхідно залучати велику кількість рятувальної техніки та особового складу, а враховуючи висоту сучасних будівель, дії з гасіння пожежі стають вкрай складним завданням для пожежно-рятувальних підрозділів [24].

Серед одних із найбільш безпечних сучасних типів опорядження фасаду є «поліфасад», що є двошаровим декоративним покриттям у вигляді плит товщиною від 3 до 12 см. Першим шаром є теплоізоляційна

основа, як правило виконана із спресованої базальтової вати або для дешевих зразків пінополістиролу (група горючості Г1-Г3), згідно з вимогами [20]. Другий шар покриття є декоративним, в основі конструкції його є білий цемент та пісок, до якого для покращення експлуатаційних характеристик підмішуються полімерні добавки, зокрема плита армується фірбоволокном, щоб забезпечити необхідні показники зносостійкості та міцності. Товщина зовнішнього шару в деяких моделях сягає 2 см [12].

Способом кріплення «поліфасаду», як правило, є застосування клейових сумішей, а також для висотних будинків застосовують додатково анкерні кріплення для більш надійного захисту від вітрових навантажень та міркувань безпеки довготривалої експлуатації [25]. На рис. 1.4 наведено «Поліфасад» із застосуванням керамічної плитки на клейовій основі.



Рисунок 1.4 – Поліфасад із застосуванням керамічної плитки [12]

Серед переваг, які можуть впливати на обмеження поширення пожежі для описаних типів фасадів, а саме «мокрого фасаду», «сухого фасаду» та «поліфасаду» є наявність зовнішньої вертикальної перешкоди (міжповерхового простінку) висотою, як правило, в межах 1,2-2,0 м між світловими прорізами (вікнами) з нормованим класом вогнестійкості. Наявність цього типу зовнішньої вертикальної міжповерхової перешкоди з нормованим класом вогнестійкості є важливою передумовою обмеження

поширення пожежі, навіть при використанні неефективних, з точки зору обмеження теплового впливу від пожежі, фасадних систем. Як правило, такі вертикальні міжповерхові перешкоди виконані із негорючих матеріалів, а саме: цегли, піноблоку, газоблоку, в тому числі, для випадків заповнення зовнішніх стін у будівлі з монолітним каркасом.

Окрім цього, для «мокрого фасаду», «сухого фасаду» та «поліфасаду» існує можливість передбачення додаткових конструктивних елементів для забезпечення обмеження поширення пожежі зовнішніми вертикальними конструкціями, в тому числі шляхом застосування протипожежних карнизів та протипожежних поясів, що передбачено в нормах [24, 26]. Ці протипожежні конструктивні елементи можна віднести до пасивних протипожежних систем, якими обладнується будинок чи споруда.

Окреме місце в сучасній архітектурі займають скляні світлопрозорі фасади в яких, як правило, відсутні зовнішні вертикальні міжповерхові протипожежні перешкоди (міжповерхові простінки) з нормованим класом вогнестійкості. Окрім цього, дані типи фасадів часто комбінуються у виконанні з медіафасадами або радіальними фасадами з навісними вентиляльованими панелями. Складні світлопрозорі фасади, як правило, застосовують у каркасно-монолітних будинках або будинках зібраних із збірних сталевих конструкцій [12]. Типи скління та конструктивне виконання має багато конструктивних варіантів, таким чином доречно узагальнити основні існуючі типи скляних світлопрозорих фасадів. Коротко зупинімося на кожному із вищезазначених типів.

Перший тип світлопрозорого фасаду складається із скління, яке суцільно заповнює комірки світлових прорізів у приміщеннях на кожному поверсі. Кожен поверх розділяє міжповерхове перекриття з нормованим класом вогнестійкості залежно від ступеня вогнестійкості будівлі. Конструкція кожного світлового прорізу має зовнішню огорожувальну

конструкцію з нормованим класом вогнестійкості, яка може виконувати роль вогнеперешкоджувача [12].

Похідною від вищеописаного типу фасаду є скляний світлопрозорий фасад зі склінням, яке суцільно по горизонталі (поясом) заповнює світловий проріз по горизонталі всього поверху. Кожен поверх розділяє міжповерхове перекриття з нормованим класом вогнестійкості, що відповідає ступеню вогнестійкості будівлі. Серед недоліків цього типу фасаду є те, що він не обмежує поширення полум'я по горизонталі між приміщеннями в межах поверху, навіть за наявності міжкімнатних суцільних перегородок, що обумовлене послідовним з'єднанням блоків склопакетів. Окрім цього, кріплення таких панелей, в разі руйнування від температури, взаємопов'язане із суміжними скляними пакетами та спричиняє в більшості випадків послідовне руйнування всієї секції склопрозорого фасаду. На рис. 1.5 наведено приклади світлопрозорого фасаду комірчастого типу скління та фасад з горизонтальним рядним склінням [12].



а)



б)

Рисунок 1.5 – Скляні світлопрозорі фасадні системи, де:

а – комірчастий тип скління; б – рядний тип скління [12]

Серед найбільш поширених сучасних типів фасадних систем слід відмітити скляний світлопрозорий фасад зі суцільним склінням по вертикалі

та горизонталі, при цьому конструкція суцільного скляного світлопрозорого фасаду може бути самостійною самонесучою конструкцією. Цей тип фасаду є набагато складнішим не лише з архітектурної точки зору виконання таких фасадів, але і технологій кріплення скляних панелей до несучих будівельних конструкцій будівлі. Спайдерне або планарне кріплення фасадів відноситься до безрамного скління без використання профілю, що дає змогу створювати масштабні, ідеально гладкі скляні поверхні. Фасади будівель, засклені за технологією планарного скління, відрізняються мінімальною кількістю видимих елементів кріплення. Кріплення здійснюється за допомогою просторових кронштейнів (спайдерів) із високолегованої сталі, які є елементами дизайну. Вантова система каркаса (з використанням силових тросів), і спайдерне кріплення світлопрозорих елементів перерозподіляють і компенсують фізичні навантаження на конструкцію кріплень фасадів [27]. З точки зору пожежної безпеки слід відмітити, що такі конструкції не включають елементи, які можуть обмежувати температурний вплив від пожежі, а також у випадку руйнування одного із елементів фасадної системи, може відбутися прогресивне руйнування зовнішніх огорожувальних скляних конструкцій і полум'я пожежі почне безперешкодно поширювати свій вплив на верхні поверхи. На рис. 1.6 наведено приклад спайдерного або планарного кріплення фасадів [12].



Рисунок 1.6 – Скляні світлопрозорі фасадні системи із суцільним склінням та спайдерним кріпленням [12]

Слід відзначити, що різноманітні технології кріплення фасадних систем та сучасні архітектурні рішення не можуть обходитися без комбінованих систем, які поєднують в собі не лише різні типи кріплення світлопрозорих скляних модулів, але і можуть бути інтегровані в фасадні системи «мокрого» та «сухого» типів. Разом із цим слід розуміти, що поєднання різнотипних технологій спорудження фасадних систем в одній споруді ускладнює можливість прогнозування потенційних пожежних ризиків та відповідно можливість передбачення заходів з обмеження поширення фасадних пожеж. На рис. 1.7 наведено приклад комбінованого типу фасадних систем, а саме «сухий» фасад в комбінації із світлопрозорим фасадом із стійко-ригельним типом фіксації конструкції скляних модулів.

Стійко-ригельні конструкції для кріплення скляних фасадів з точки зору пожежної безпеки є найбільш безпечним через використання негорючих конструктивних елементів та монтажних матеріалів з високим термічним опором [12].



Рисунок 1.7 – Комбінований тип фасадної системи в комбінації «сухого фасаду» та світлопрозорого із скляними модулями [12]

До основних конструктивних елементів в цьому типі фасадних систем відносяться вертикальні металеві стійки, до яких механічним

шляхом кріпляться горизонтальні ригелі. Склопакети встановлюються зовні на алюмінієві опорні пластини, які попередньо закріплюються до ригелів. В процесі монтажу склопакети фіксуються за місцем за допомогою синтетичних скоб, пригвинчених до несучих профілів. Ущільнювачі з термо-морозостійкої гуми забезпечують герметизацію стиків між склом і алюмінієвими несучими профілями. Притискні планки склопакетів кріпляться болтами з нержавіючої сталі. Потім на притискні планки встановлюються декоративні алюмінієві кришки. Структура такої конструкції розташовується з внутрішнього теплового боку навісної стіни [25]. Перевагою цієї фасадної системи з конструктивної точки зору є можливість реалізації багатьох варіантів з'єднання профілів, які, як правило, виконуються із алюмінію або нержавіючої сталі. Окрім простоти кріплення, ця фасадна система є найбільш економічною та пожежобезпечною через мінімальну кількість кріпильних елементів, які можуть пошкодитися в результаті пожежного впливу і відповідно зруйнуватися. На рис. 1.8 наведено приклад вузла кріплення склопакета та зовнішній вигляд змонтованого фасаду за стійко-ригельною системою кріплення [12].

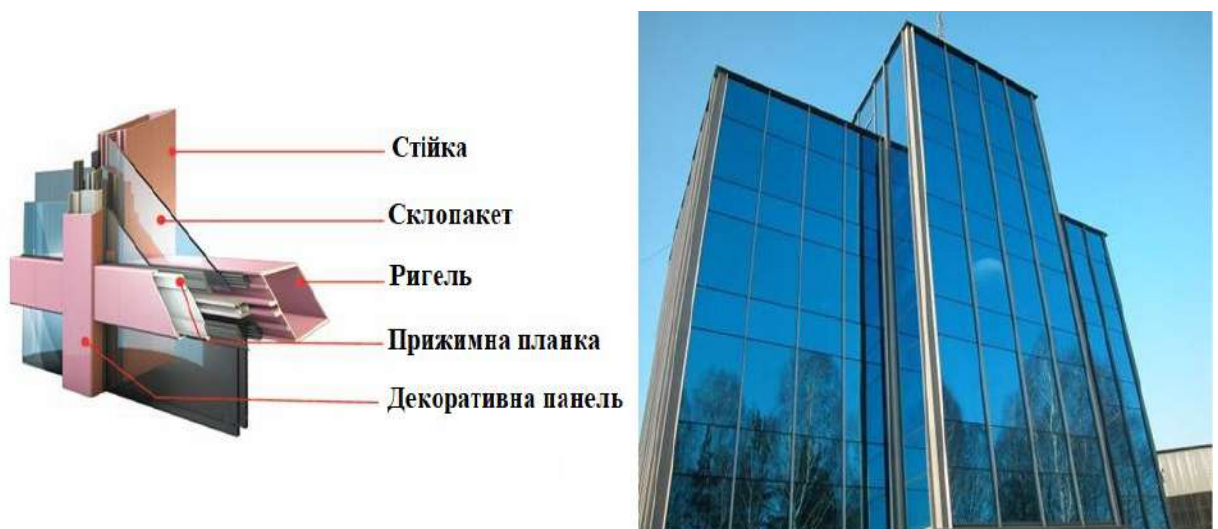


Рисунок 1.8 – Стійко-ригельна скляна фасадна система та приклад змонтованого фасаду будівлі [12]

Серед найбільш пожежонебезпечних світлопрозорих фасадних систем слід виділити метод структурного кріплення скляних модулів до несучих будівельних конструкцій будівлі. Ця будівельна технологія застосовується під час облицювання фасаду прозорими склопакетами, при цьому будівля зовні виглядає цілісною скляно-дзеркальною стіною. Технологія структурного скління заснована на кріпленні склопакетів до фасаду будівлі за допомогою герметика (силікону), який є несучим елементом конструкції. Структурне скління фасаду відрізняється від стійко-ригельного відсутністю із зовнішнього боку скління металевих частин (притисків і декоративних планок). При цьому, склопакет приклеєний за особливою технологією до алюмінієвої рами утворює касету структурного скління [28].

Фіксація системи структурного скління відбувається з торця заповнення, а в простір між склопакетами встановлюються термоізолюючі матеріали, зовні шов заповнюється силіконовим герметиком або ущільнювачем. Тобто, в разі пожежі або навіть незначного термічного впливу такий герметик із високою ймовірністю втратить свої міцнісні властивості і фасадна конструкція може зруйнуватися, що спричинить умови для безперешкодного поширення фасадної пожежі на верхні поверхи. На рис. 1.9 наведено основні конструктивні елементи структурного кріплення скляних модулів світлопрозорої фасадної системи [12].

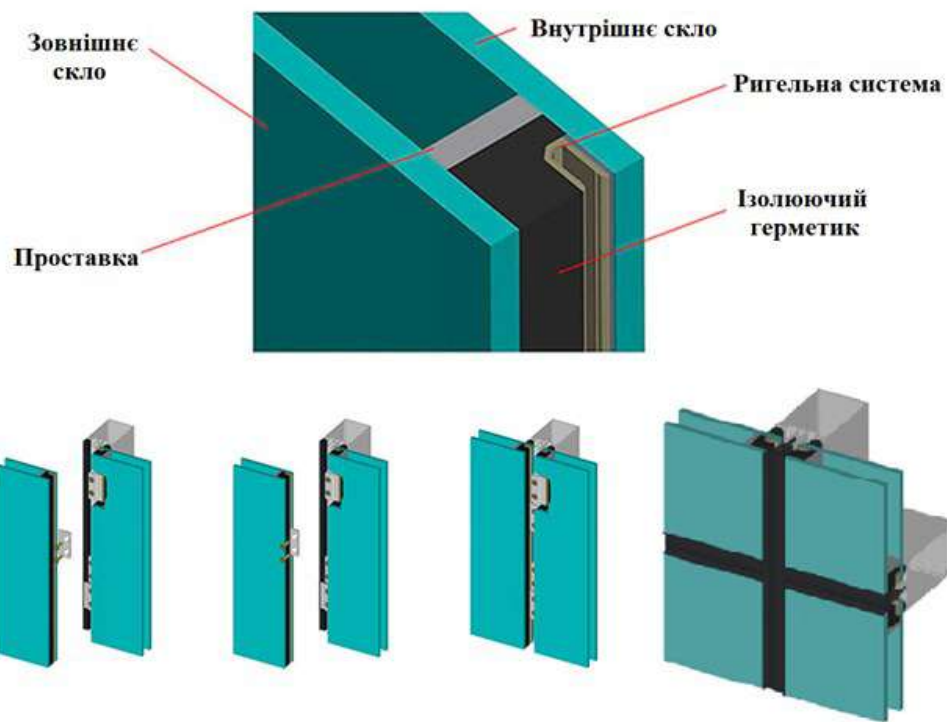


Рисунок 1.9 – Елементи структурного кріплення скляних модулів світлопрозорії фасадної системи [12]

Таким чином, за результатами проведеного аналізу узагальнено та систематизовано основні типи скляних світло-прозорих фасадів, а також наведено особливості технології монтування скляних модулів до несучих будівельних конструкцій будівлі, які можуть впливати на пожежну безпеку поширення фасадної пожежі.

Разом із тим, під час аналізу пожежної небезпеки конструктивних особливостей зовнішніх вертикальних огорожувальних конструкцій слід відмітити новітні типи фасадних систем, які все ширше застосовують під час нового будівництва, а саме кінетичні або динамічні фасади. Зазначений тип фасадних систем є інноваційним напрямом сучасної архітектури в основі якого лежить зміна форми фасаду під дією вітрових, світлових, температурних впливів [29]. Різноманітність матеріалів облицювання, форми захисних штор та можливі медіаелементи конструкцій, а також технології їх монтування, є здебільшого індивідуальними інженерними рішеннями, а тому систематизація та дослідження закономірностей впливу

того чи іншого компонента фасадної системи на пожежну небезпеку поширення пожежі зовнішніми огорожувальними вертикальними конструкціями є предметом індивідуальних досліджень для кожної будівлі та не може бути на даний час узагальнена [12].

За результатом наведеного аналізу зведемо дані до загальної таблиці з описом переваг та потенційних пожежних небезпек для різних типів конструкцій фасадних систем.

Таблиця 1.1

Зведена таблиця пожежних характеристик для різних типів конструкцій фасадних систем [12]

Тип фасадної системи		Конструктивні переваги	Конструктивні недоліки
Мокрий фасад		- можливість влаштувати протипожежні карнизи та пояси;	- можливість використання горючих утеплювачів або інших неякісних матеріалів опорядження
Сухий фасад		- можливість влаштувати протипожежні розриви;	- можливість використання горючих облицювальних матеріалів;
		- можливість влаштувати водяні протипожежні системи зрошення;	- утворення повітряного прошарку між несучою конструкцією та фасадним облицюванням;
		- можливість зміни параметрів протипожежних міжповерхових віконних простінків.	- можливість використання в конструкціях фасадних систем матеріалів з низьким термічним опором.
Поліфасад			не виявлено
світлопрозорі скляні фасадні системи	комірчастого типу	- можливість влаштувати протипожежні карнизи та пояси;	- можливість використання горючих утеплювачів або інших неякісних матеріалів опорядження
		- можливість влаштувати протипожежні розриви;	
		- можливість влаштувати водяні протипожежні системи зрошення;	
		- можливість зміни параметрів протипожежних міжповерхових віконних простінків.	

	рядний тип скління	- відсутність можливості використання горючих утеплювачів або інших неякісних матеріалів опорядження; - відсутність повітряного прошарку між несучою конструкцією та фасадним облицюванням.	- відсутність можливості встановлення будь яких пасивних чи активних вогнеперешкоджувачів; - можливість прогресивного руйнування зовнішніх огорожувальних конструкцій фасаду в межах поверху.
	суцільне скління		- відсутність можливості встановлення будь яких пасивних чи активних вогнеперешкоджувачів; - загроза прогресивного руйнування зовнішніх огорожувальних конструкцій фасаду
	стійко-ригельне скління		- відсутність можливості встановлення будь яких пасивних чи активних вогнеперешкоджувачів; - можливість використання в конструкціях фасадних систем матеріалів з низьким термічним опором, що може призвести до прогресивного руйнування фасаду
	структурне скління		- відсутність можливості встановлення будь яких пасивних чи активних вогнеперешкоджувачів; - загроза прогресивного руйнування зовнішніх огорожувальних конструкцій фасаду через використання в конструкціях фасадних систем герметиків з низьким термічним опором.

За результатом систематизації та узагальнення отриманих даних можна зробити попередній висновок, що найбільш пожежобезпечним типом оздоблення фасадних систем є поліфасад. Зазначений тип фасадної системи має найменші ризики використання горючих матеріалів або просто неякісних кріпильних елементів, при цьому цей тип фасаду дає змогу додатково встановлювати активні або пасивні вогнеперешкоджувальні системи на кшталт водяних завіс або протипожежних карнизів, згідно з чинними нормами [21, 22]. Найбільш

невивченими фасадними системами залишаються кінетичні фасади, пожежна небезпека яких здебільшого залежить від їх конструктивного виконання, а потенціал їх використання в якості активної системи обмеження поширення пожежі ще потребує додаткового вивчення.

Окремим не вирішеним питанням залишаються критерії або показники пожежної небезпеки фасадних систем будівель та споруд. Аналіз пожеж та їх наслідків показує, що проведення випробувань будівельних конструкцій на поширення вогню та наявність горючих матеріалів в складі фасадних систем є первинним чинником, який впливає на поширення пожежі. Інтенсивність подальшого розвитку пожежі та її вертикальне поширення на верхні поверхи в більшості випадків спричинені руйнуванням конструкцій вікон, що зокрема було доведено натурними випробуваннями в роботі [30], а тому питання критеріїв потребує додаткового дослідження.

Таким чином, загроза поширення пожежі поверхнею теплоізоляційно-оздоблювальної системи зумовлена не лише пожежною небезпекою матеріалів, але також залежить від конструктивних особливостей самої будівлі та параметрів пожежі. На процес поширення вогню фасадними системами впливає кілька факторів, таких як зовнішні умови (теплові потоки з віконних отворів, температурні режими горіння теплоізоляційного матеріалу), пожежно-технічні характеристики матеріалу теплоізоляції (температура запалення, швидкість поширення вогню по матеріалу, температура самозапалювання тощо), а також архітектурні та об'ємно-планувальні особливості будівлі.

1.2 Статистика пожеж у будинках і спорудах із застосуванням систем фасадної теплоізоляції

Поширення пожежі по фасадам будівель вважається одним з найбільш небезпечних сценаріїв розвитку пожежі, оскільки вона характеризується швидким поширенням, складнощами у гасінні, наявністю достатньої кількості кисню та додатковим впливом вітру, що сприяє прискореному поширенню вогню по фасадам будівель [31]. Аналіз статистичних даних про пожежі, їх причини та наслідки у висотних будівлях за останні десять років в Україні показує, що кількість пожеж у таких будівлях та число жертв зростає щороку, що відображає постійне збільшення кількості висотних споруд [10].

Світова статистика свідчить, що у різних країнах виникає значна кількість пожеж у будівлях, облаштованих системами фасадної теплоізоляції. Наприклад, за даними Державної пожежної служби Польщі [32] впродовж останніх 4-х років в країні зафіксовано 117 випадків пожеж на фасадах будівель, утеплених пінополістиролом [33]. У 67 % таких пожеж виникали труднощі під час евакуації та рятування людей, а зовнішнє облицювання сприяло поширенню вогню з одного поверху на інший, у 13 % випадків вогонь поширився із зовнішніх стін на покрівлю. В США, відповідно до [34], пожежі “зовнішніх стін” будівель та споруд становлять від 1,3 % до 3 % від кількості пожеж у обраних типах об'єктів. Американські фахівці зазначають, що такі пожежі мають низьку частоту виникнення, проте пов'язані з ними наслідки, з точки зору поширення пожежі, травм і загибелі людей, можуть бути значними [33].

Крім цього, аналіз пожеж та їх наслідків як в Україні, так і за кордоном, вказує на те, що більшість пожеж у висотних будівлях супроводжується поширенням вогню через фасади. Це ускладнює їх швидку ліквідацію та унеможливорює ефективну діяльність пожежно-рятувальних служб, що передбачає залучення спеціальної протипожежної техніки для гасіння таких пожежі [35]. Поширення вогню через зовнішні

вертикальні конструкції висотних будівель також перешкоджає її ліквідації на початковій стадії виникнення, навіть при наявності систем протипожежного захисту, якими зазвичай оснащуються такі будівлі [36].

Аналізуючи приклади найбільш резонансних пожеж, що виникали в будівлях протягом останніх декількох років як в Україні, так і за її межами та супроводжувалися горінням фасадних систем, можна констатувати проблему в забезпеченні пожежної безпеки конструкцій зовнішніх стін будівель та споруд із фасадною теплоізоляцією як на етапі будівництва, так і під час їх експлуатації. До таких пожеж в будівлях та спорудах із фасадною теплоізоляцією призводять не лише грубі порушення правил пожежної безпеки, а й застосування будівельних та оздоблювальних матеріалів із підвищеною пожежною небезпекою [2]. Слід зазначити, що типові пожежі мають низьку частоту виникнення, проте пов'язані з ними наслідки (площа поширення пожежі, матеріальні збитки, травми та загибель людей) можуть бути значними [10].

Всесвітній центр пожежної статистики, що діє в рамках ООН, щорічно публікує звіти порівняльного аналізу про витрати, пов'язані з ліквідацією наслідків НС у різних країнах світу. Дані світової статистики свідчать, про те, що за останні 10 років кількість НС, пов'язаних з пожежами, зроста майже втричі, кількість знищених вогнем будівель – більш ніж у 8 разів, а динаміка загибелі людей на пожежах має загальну тенденцію до зростання [37].

З одного боку, сьогодні використання фасадної теплоізоляції має безсумнівні переваги, такі як забезпечення відповідних теплотехнічних характеристик стін, захист конструкцій від негативного впливу навколишнього середовища, створення комфортного мікроклімату у приміщеннях та надання будівлям привабливого зовнішнього вигляду. З іншого боку, під час проектування та використання фасадних систем існують проблеми, пов'язані із забезпеченням їх безпеки, у тому числі, і пожежної [11, 26].

Поширення вогню по фасадах високих будинків є одним з найбільш небезпечних варіантів розвитку пожежі, через її швидке поширення, складність при гасінні, наявність достатньої кількості кисню та вплив вітру, який допомагає вогню швидко прогресувати по фасадних конструкціях. Аналіз статистичних даних про пожежі, їх причини та наслідки в високих будинках в Україні за останні десять років показує, що кількість пожеж та кількість жертв зростає щороку, що є результатом постійного росту кількості високих будівель [26, 40].

Крім того, аналіз надзвичайних ситуацій та їх наслідків в Україні та за кордоном показує, що більшість таких надзвичайних ситуацій, що сталися у висотних будівлях, супроводжуються поширенням пожеж по фасаду. Це унеможливлювало їх швидку та суттєву ліквідацію, ускладнювало роботу пожежно-рятувальних підрозділів та вимагало залучення спеціальної протипожежної техніки. Поширення пожеж по зовнішніх вертикальних будівельних конструкціях висотних будівель також унеможливило усунення аварійних ситуацій на початковому етапі виникнення, в тому числі з використанням систем протипожежного захисту висотних будівель. Найгіршим сценарієм розвитку такої надзвичайної ситуації є пошкодження або руйнування несучої конструкції будівлі, що може призвести до її повного руйнування [11, 24].

Нижче наведено інформацію про деякі резонансні пожежі, що виникали в будівлях протягом останніх декількох років як в Україні, так і за її межами, та супроводжувалися горінням фасадних систем [11].

Пожежа в житловому будинку по вул. Вадима Гетьмана, 1б у м. Києві, яка виникла 30 травня 2013 року. Пожежа виникла на відкритій перехідній лоджії на 2-му поверсі, після чого полум'я поширилося по облицюванню фасаду будинку на верхні поверхи. Стіни будівлі були облицьовані матеріалами, які утворювали багатошарові конструкції [11, 26].

Пожежа характеризувалася швидким поширенням вогню по всій висоті будинку (з 2-го по 21-й поверх) і обваленням декоративних

елементів фасаду. Складність Гасіння і особливість виникнення цієї пожежі полягала в тому, що поширення полум'я відбувалося не по поверхні, а в середині вищевказаного споруди.

Під час вигорання облицювальних і теплоізоляційних робіт поступово відбувалося руйнування і осипання декоративної керамічної плитки, що сприяло більшому припливу кисню в зону горіння [11, 26].

Загальний вигляд частини будинку, пошкодженого внаслідок пожежі, наведено на рис. 1.10.



Рисунок 1.10 – Пожежа у житловому будинку в м. Києві

Житловий будинок, що розташований на вулиці Вадима Гетьмана, 16 у місті Києві, має висоту від 26,5 метра до 73,5 метра (приблизно 67 метрів), тому шари теплоізоляції та опорядкування збірної системи фасадної теплоізоляції повинні були виконані з негорючих матеріалів.

Пожежа у висотному житловому будинку Grenfell Tower, розташованому в Північному Кенсінгтоні Лондона, що виникла 14 червня 2017 року (рис. 1.11). Цей інцидент став одним з найбільш трагічних за кількістю жертв та постраждалих. Вогонь спалахнув у одній з квартир на нижніх поверхах через загоряння холодильника, проте через низьку якість

облицювальних плит будинку він швидко поширився майже на всю будівлю. Це призвело до смерті 79 осіб та травмування ще 68, які отримали різні за ступенем важкості поранення. Для теплоізоляції будівлі використовували облицювальні фасадні матеріали, а саме композитні панелі «Reynobond PE» [26].



Рисунок 1.11 – Пожежа у висотному житловому будинку Grenfell Tower (Велика Британія) [26]

Пожежа в житловому комплексі Gagarin Plaza-1 (м. Одеса), що виникла 29 вересня 2015 року на балконі останнього поверху внаслідок необережного поводження з вогнем під час проведення ремонтних робіт. Осередок пожежі знаходився на балконі останнього 23 поверху одного з будинків, де проводилися ремонтні роботи. Вогонь швидко почав поширюватись по фасаду будинку згори вниз. За 3 години площа пожежі склала більше 3000 м².

На рис. 1.12 показано загальний вигляд пошкодженої внаслідок пожежі частини будівлі [11].



Рисунок 1.12 – Пожежа у житловому комплексі Gagarin Plaza-1,
м. Одеса [11]

Однією з причин розповсюдження пожежі була невідповідність будинку державним архітектурно-будівельним нормам, зокрема використання горючих матеріалів для утеплення зовнішніх стін, відсутність пожежного водопроводу, пожежних гідрантів, систем пожежної сигналізації та пожежогасіння [11]. Під час гасіння пожежі троє співробітників пожежно-рятувальних підрозділів отримали травми. Внаслідок пожежі згоріло 80% фасаду.

31 грудня 2015 року за кілька годин до святкування нового року в Дубаї (ОАЕ) сталася пожежа в хмарочосі «The Address Downtown» (рис. 1.13), розташованому поруч з найвищою будівлею в світі «Бурдж Халіфа». Пожежа, що спалахнула на 20-му поверсі будівлі, поширилася майже по всій висоті 63-поверхового готелю в центрі міста. Через сильний вітер полум'я швидко охопило всю будівлю. Зверху на землю почали падати фрагменти згорілих конструкцій. Сотні людей були терміново евакуйовані, 15 осіб отримали поранення [11].



Рисунок 1.13 – Пожежа готель-хмарочоса «The Address Downtown»,
м. Дубаї [11]

8 жовтня 2020 року пожежа спалахнула в місті Ульсан (Південна Корея) у 33-поверховій житловій і адміністративній будівлі між восьмим та дванадцятим поверхами (рис. 1.14). Через сильний вітер вогонь поширився на інші поверхи і охопив практично всю будівлю. Сотні людей були евакуйовані, щонайменше 88 людей постраждали. Більшість з них скаржилися на отруєння димом. Полум'я вдалося приборкати через дві години після загоряння [26].

Також внаслідок цієї пожежі загорілася сусідня будівля торговельного центру.



Рисунок 1.14 – Пожежа у 33-поверховому житловому будинку у м. Ульсан [26]

Таким чином, вище наведені приклади свідчать про те, що пожежі, пов'язані із займанням систем фасадної теплоізоляції у будинках і спорудах становлять особливу небезпеку для висотних будинків і будинків підвищеної поверховості через особливості їх конструктивно-планувальних рішень, призначення, технології зведення та подальшої експлуатації.

На процес розвитку та поширення пожежі конструкцією фасадних систем впливатимуть такі чинники: потужність теплового випромінювання, вид та кількість горючого облицювального матеріалу, дія зовнішніх умов (сила та напрямок вітру, наявність конвективного потоку тощо) [11]. На формування вітрових потоків, які спрямовані вздовж поверхні фасаду будівлі, значно впливає природна конвекція. Це явище виникає через градієнт температур навколишнього середовища і поверхні фасаду, який нагрівається сонячним випромінюванням, внаслідок чого з'являється конвективний тепловий потік, спрямований вгору будівлі. Він

сприятиме не лише розповсюдженню вогню на великі площі фасадної системи, але й впливатиме на висоту та температуру факела полум'я [11].

Вентильований прошарок створює додаткову тягу та зумовлює поширення пожежі всередині фасадної конструкції. Наявність такого прошарку шириною до 10-15 см створює потужний повітряний потік і сприяє швидкому поширенню пожежі не лише всередині НВФС, але й може бути причиною для поширення пожежі у внутрішні приміщення будівлі. Під час пожежі під впливом високих температур будуть руйнуватися несучі та кріпильні елементи фасадної системи, внаслідок чого відбудеться обвалення облицювальних конструкцій [11]. Окремі елементи навісного фасаду після падіння можуть утворювати додаткові осередки займання, що призводить до додаткових матеріальних збитків та можливого травмування людей.

Аналізуючи вищенаведені приклади пожеж у будівлях, можна констатувати наявність проблем у забезпеченні безпеки конструкцій зовнішніх стін будівель та споруд із фасадною теплоізоляцією, як на етапі будівництва, так і під час їх експлуатації [20]. Розвитку пожеж до великих масштабів сприяють порушення вимог пожежної безпеки під час влаштування фасадних систем (застосування будівельних та оздоблювальних матеріалів із підвищеною пожежною небезпекою, відсутність конструктивних елементів, які перешкоджають поширенню пожежі), відсутність засобів пожежогасіння або проблеми з їх доставкою, несвоєчасне повідомлення про виникнення пожежі.

1.3 Механізм поширення пожежі поверхнею конструкцій зовнішніх стін із фасадною теплоізоляцією з горючим утеплювачем та опорядженням штукатуркою

Використання систем теплоізоляції фасадів підвищує енергоефективність будівель, поліпшує їхні теплотехнічні характеристики і зміцнює архітектурний вигляд, але збільшує ризик пожежі. Багато дослідників, як в Україні, так і за кордоном, досліджували проблеми пожежної безпеки фасадних систем, зокрема навісних вентильованих [31].

У своїй публікації [41] Новак С. В., Нефедченко Л. Н. та Коваленко В. В. дослідили пожежну небезпеку зовнішніх стін з фасадною теплоізоляцією. Автори вважають, що чинні нормативні вимоги та методи визначення властивостей пожежонебезпеки таких систем в Україні не повністю забезпечують пожежну безпеку будівель у процесі їх експлуатації. Вони підкреслюють необхідність вдосконалення вимог та методів тестування відповідно до вимог Технічного регламенту на будівельні вироби, будівлі і споруди.

У наукових публікаціях [42-48] наголошується на важливості вирішення проблеми забезпечення пожежної безпеки таких будівель та відмічається відставання протипожежних норм від сучасних архітектурних та конструктивних рішень.

У своїй роботі [42] G. Jensen проводить аналіз європейських та американських стандартів для випробування навісних вентильованих фасадів на вогнестійкість, а також порівнює ефективність перфорованих та неперфорованих протипожежних бар'єрів за методикою, описаною в європейському стандарті ASTM E2912-17 [43].

У роботах [44-45] дослідники розглядають основні труднощі, пов'язані із монтажем систем навісних вентильованих фасадів, серед яких вирізняється питання пожежної безпеки таких конструкцій та використання горючих матеріалів для обробки їх поверхонь.

У роботі [46] виконано моделювання поширення полум'я по поверхні теплоізоляційних матеріалів, таких як екструдований пінополістирол (XPS) та поліуретан. Зареєстровано швидкість тепловиділення для аналізу інтенсивності горіння, де висота полум'я виміряна як залежність від тепловиділення. Досліджено взаємозв'язок між висотою полум'я та загальним тепловим потоком.

У роботі [47] M. Kumm, J. Söderström і A. Lönnermark розглядають проблеми, які можуть виникнути для пожежно-рятувальних служб під час гасіння пожеж у фасадах будівель, облаштованих теплоізоляцією зі спіненого пінополістиролу (EPS). Автори аналізують характеристики EPS та результати пожежних випробувань, які були проведені на тренувальному полігоні пожежно-рятувальних служб. Вони висвітлюють загрози, які можуть ускладнити або повністю перешкодити безпечній евакуації людей під час пожежі в фасаді будівлі.

У дослідженні [48] G. Zhang, G. Zhu і G. Zhao намагалися відтворити сценарій зовнішньої пожежі в системах теплоізоляції фасаду та запропонували метод кількісної оцінки ризику виникнення пожеж у теплоізоляційно-оздоблювальних системах за допомогою програмного забезпечення Fire Dynamics Simulator (FDS). Також було проведено експериментальні дослідження характеристик піролізу та горіння зразків екструдованого полістиролу (XPS), таких як температура запалювання, теплота згоряння, граничний кисневий індекс, термогравіметричний аналіз та аналіз теплового випромінювання.

Фасадна теплоізоляційна система діє як єдиний механізм, де кожен шар виконує власні специфічні завдання.

Системи комплектів ізоляції з опорядженням, що містять світлопрозорі елементи, реалізуються з тепловою ізоляцією, яка може бути прикріпленою або самонесучою в межах поверхні (ярусу), що встановлюється з повітряним простором між її зовнішньою поверхнею та захисним світлопрозорим шаром. Комплект включає в себе світлопрозорі

елементи, несучу конструкцію, яка складається зі стовпів, балок, кріпильних елементів, та непрозорі елементи з тепловою ізоляцією з боку приміщення.

Для виявлення критеріїв, які характеризують небезпеку поширення пожежі вертикальними будівельними конструкціями і враховують їх конструктивні та інженерні особливості слід провести систематизацію відомих типів фасадних систем за конструктивними типами та видами матеріалів, з яких вони виготовлені, що є передумовою обґрунтування превентивних протипожежних заходів. Слід розуміти, що в більшості випадків, крім дотримання вимог пожежної безпеки, облаштування фасадних систем різного типу для житлових, громадських та адміністративних будівель пов'язане із забезпеченням їх енергоефективності шляхом утеплення зовнішніх огорожувальних конструкцій, а також слід враховувати архітектурну складову [12].

Статистичні дані про пожежі за 2021 рік свідчать [49], що в середньому 68% пожеж у багатоповерхових житлових та громадських будинках супроводжувалися поширенням пожежі на верхні поверхи в результаті поширення полум'я поверхнею фасаду, при цьому на сьогодні аналізу наслідків від таких пожеж, з врахуванням конструктивних особливостей для найбільш поширених типів фасадів, фактично немає. Тобто проведені дослідження, зокрема наведені в [50], в основному стосуються пожежної небезпеки будівельних матеріалів, які використовуються у фасадних системах або протипожежних конструктивних заходів, які спрямовані на обмеження поширення пожежі, зокрема, як приклад, протипожежні пояси. Разом із цим, конструктивне виконання та використання навіть окремих, не основних пожежонебезпечних елементів фасадних систем може бути передумовою поширення пожежі незважаючи на виконання зовнішнього шару із негорючих матеріалів, а способи їх кріплення можуть значно вплинути на

стійкість до руйнування в умовах реальної пожежі, що може негативно впливати на її поширення [12].

Аналізуючи результати досліджень щодо обмеження поширення пожеж зовнішніми вертикальними конструкціями будівель, можна стверджувати, що на сьогодні немає систематизованих даних пожежної небезпеки конструктивного виконання фасадних систем різного типу. Значна кількість робіт [51-52] присвячена питанням влаштування протипожежних поясів, в тому числі по периметру вікон та інших типів світлових прорізів, а також питанням обґрунтування параметрів міжповерхових протипожежних зовнішніх простінків, приклад яких наведено на рис. 1.15.

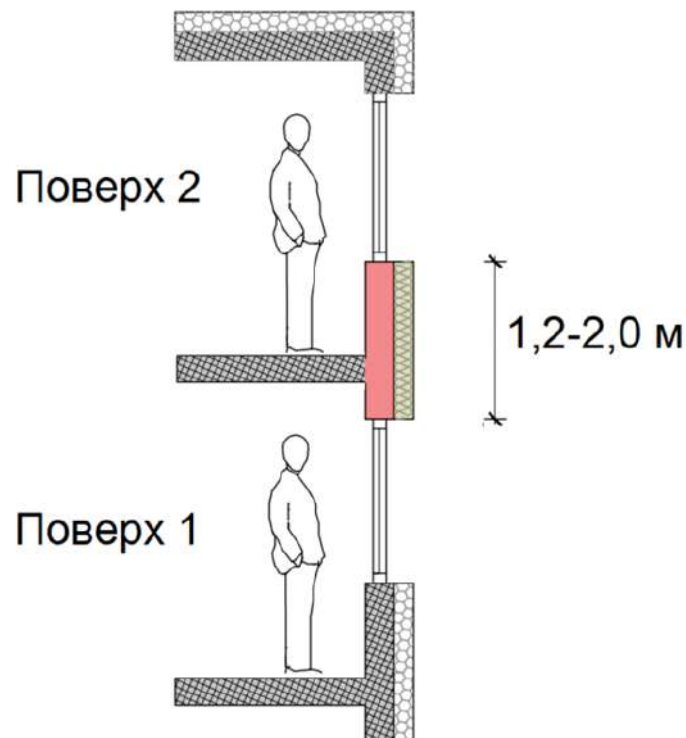


Рисунок 1.15 – Приклад зовнішнього міжповерхового протипожежного простінку розмірами 1,2-2,0 м [12]

Однак, у цих дослідженнях недостатньо вивчені та систематизовані конструктивні параметри фасадних систем, які впливають на обмеження поширення пожежі зовнішніми вертикальними конструкціями або навпаки, сприяють поширенню пожежі та відповідно є небезпечними.

Для оцінки ризику пожежі конкретної штукатурної фасадної теплоізоляційної системи важливо мати інформацію про пожежно-технічні характеристики горючого матеріалу утеплювача, такі як температура термічного розкладу, температура займання, швидкість поширення вогню по поверхні, температура самозаймання, температура плавлення та інші. Ці параметри визначають тепловіддачу одиниці маси застосовуваного матеріалу утеплювача та його тепловиділення, що визначає рівень пожежної небезпеки цього виду теплоізоляційного матеріалу. Крім того, важливо проаналізувати та висвітлити особливості процесів, що відбуваються під час горіння теплоізоляційно-оздоблювальної системи зовнішніх стін житлових будинків [31].

Існують три типові сценарії (рис. 1.16) розповсюдження вогню поверхнею конструкції зовнішніх стін із фасадною теплоізоляцією з опорядженням штукатуркою [31]:

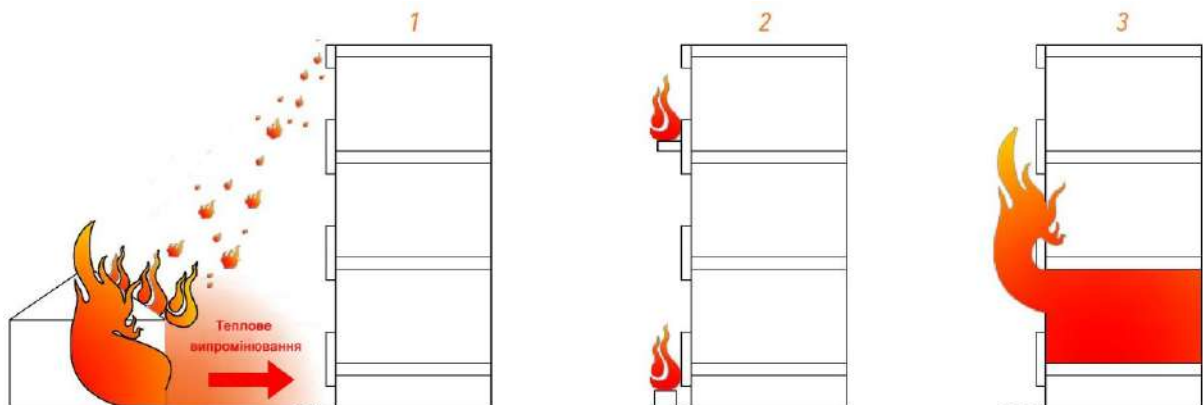


Рисунок 1.16 – Типові сценарії поширення пожежі по поверхні теплоізоляційно-оздоблювальної системи [53, 54]:

1 – в результаті теплового випромінювання на суміжну будівлю (буде залежати від декількох факторів: розміри і форма джерела випромінювання, потужність джерела випромінювання та властивості поверхні, яка сприймає випромінювання, відстань між будівлями тощо);

2 – перекиданням вогню з джерела пожежі, що знаходиться поблизу фасаду через пряму дію полум'я (пожежа сміття на балконі, пожежа припаркованих автомобілів в безпосередній близькості до будинку та ін.);

3 – перекиданням вогню з віконного отвору будівлі на верхні поверхи в результаті інтенсивної пожежі в приміщенні.

Одними з найпоширеніших причин загоряння систем теплоізоляції зовнішніх стін є перекидання вогню з віконної рами будівлі унаслідок інтенсивної пожежі всередині приміщення. У таких ситуаціях конвективні потоки тепла можуть сприяти запаленню горючого покриття зовнішніх стін. Після руйнування віконного скла полум'я, що виходить через віконний отвір, може досягати висоти до 5 метрів [31].

На висоту полум'я буде впливати швидкість повітряного потоку (протягу), який може утворитися в результаті руйнування віконного скла (рис. 1.17).

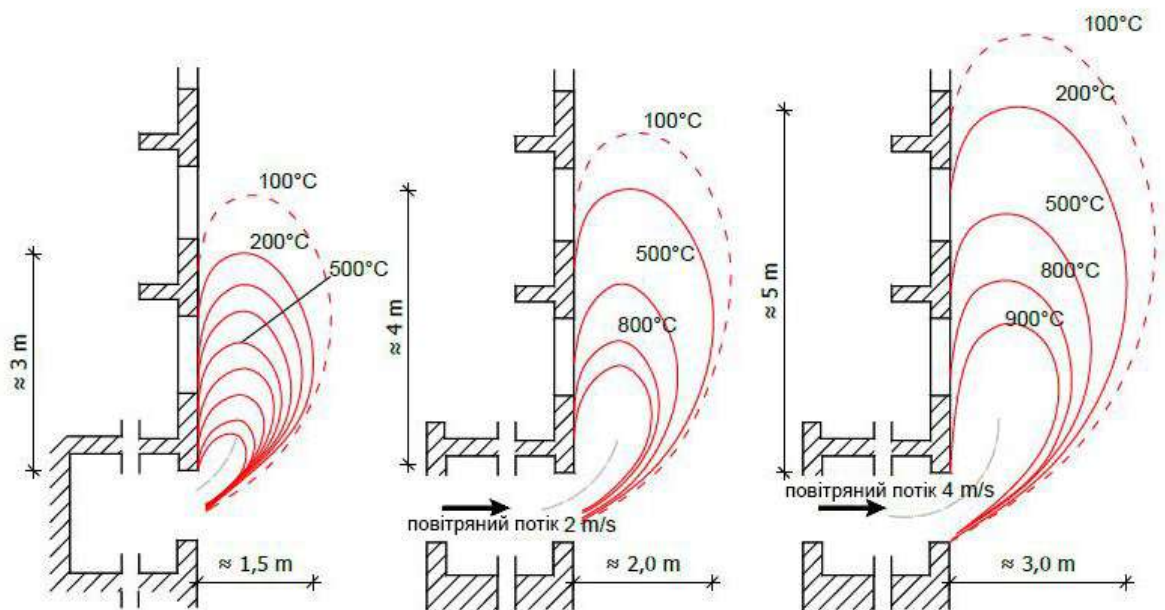


Рисунок 1.17 – Залежність висоти та температури полум'я від швидкості повітряного потоку [53, 54]

В подальшому розповсюдження пожежі по поверхні фасадної системи залежатиме від конструктивних особливостей самої системи та матеріалу теплоізоляції, який горить. Крім того, на поширення вогню впливатимуть наявність порожнин на поверхні фасаду, які можуть утворитися під час пожежі через руйнування захисного шару матеріалу [31].

Коли полум'я потрапляє у таку порожнину, може відбутися швидке вертикальне поширення пожежі, яке може залишитися непоміченим, оскільки воно відбувається під захисним шаром оздоблювально-захисної структури фасадної системи (рис. 1.18). Присутність отворів на фасаді будівлі, таких як вікна та двері, сприяє збільшенню площі пожежі через додаткове проникнення вогню всередину будівлі, відповідно до вищезгаданого механізму [31].

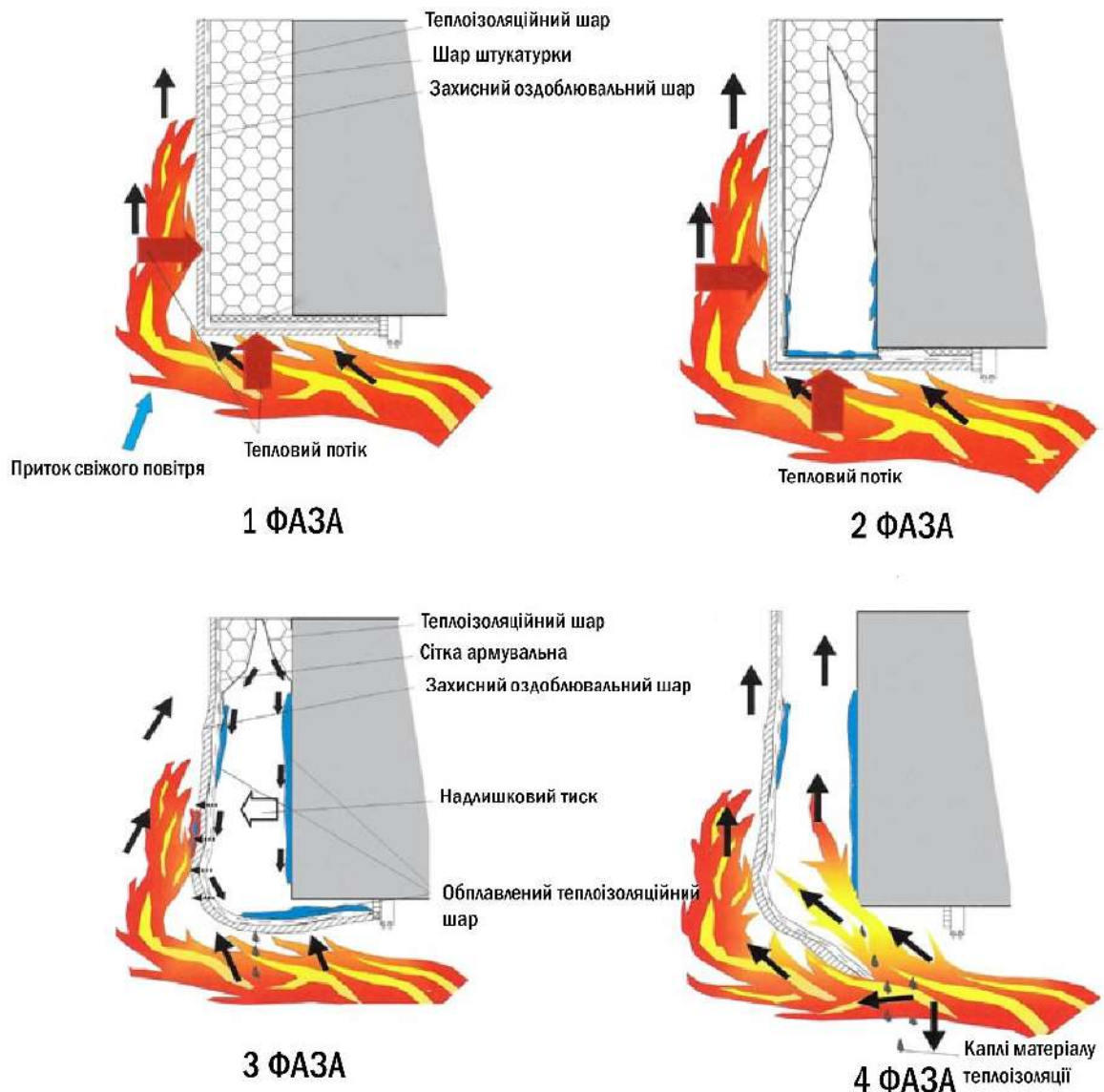


Рисунок 1.18 – Механізм поширення вогню через віконний отвір поверхнею фасадної теплоізоляції на основі пінополістиролу [53, 54]

На першій фазі пожежі, коли вогонь поширюється через віконний отвір, висока температура впливатиме на поверхню теплоізоляційно-оздоблювальної системи фасаду. Після досягнення критичної температури горючий утеплювач (пінополістирол) почне плавитися, утворюючи порожнини всередині системи теплоізоляції. Може також статися часткове руйнування оздоблювально-захисного шару (друга фаза).

На третій фазі в утворених порожнинах почне створюватися надлишковий тиск від газів піролізу утеплювача. Частина газів почне виходити назовні, проникаючи через шар штукатурки, що спричинить подальше руйнування оздоблювально-захисного шару, утворення та поширення тріщин. Під вагою розплавленого утеплювача система теплоізоляції почне руйнуватися, а розплавлений матеріал стікатиме, що може призвести до виникнення нових осередків пожежі на нижче розташованих поверхах.

На четвертій фазі відбудеться повний термічний розклад горючого утеплювача. Полум'я продовжить поширюватися як по поверхні фасаду, так і всередині теплоізоляційної системи, що призведе до її повного руйнування [31].

1.4 Висновки до розділу

1. Використання горючих теплоізоляційних матеріалів для утеплення фасадів є економічно вигідним, проте підвищує ризик для життя та здоров'я людей під час пожежі. Тому забезпечення пожежної безпеки житлових будівель з теплоізоляційно-оздоблювальними системами зовнішніх стін потребує ретельного дослідження.

2. Для визначення пожежної небезпеки таких конструкції необхідно враховувати увесь комплекс небезпечних властивостей теплоізоляційного матеріалу, а саме: горючість, займистість, здатність до поширення вогню, швидкість тепловиділення, димоутворення та токсичність продуктів горіння. Для цього потрібно вносити зміни у діючі норми та стандарти.

3. Під час пожежі вогонь може швидко поширюватися на великі площі. Крім того, горіння пінополістиролу, який є найпоширенішим теплоізоляційним матеріалом, супроводжується виділенням великої кількості диму та токсичних продуктів, що ускладнює евакуацію та порятунок людей. Тому необхідно вживати протипожежних заходів для обмеження поширення пожежі, таких як створення протипожежних розривів з негорючих матеріалів та захист віконних прорізів, а також забезпечувати безпечні умови для евакуації людей з палаючої будівлі.

4. Суттєвою проблемою теплоізоляції будівель є використання неякісних, дешевих матеріалів, які не відповідають сертифікатам якості, а також порушення вимог Технічного регламенту при проектуванні та монтажі фасадних теплоізоляційних конструкцій і недотримання правил експлуатації будівель із зовнішніми стінами з теплоізоляцією.

5. Однією з найпоширеніших причин займання систем теплоізоляції зовнішніх стін житлових будинків є перекидання вогню через віконний проріз будівлі внаслідок інтенсивної пожежі всередині приміщення. У таких умовах конвективні потоки тепла можуть спричинити займання горючого оздоблення зовнішніх стін. Після руйнування віконного скла

полум'я, що виходить через віконний отвір, може досягати висоти понад 5 метрів.

6. Штукатурні системи теплоізоляції фасадів становлять значну загрозу швидкому поширенню пожежі на вище та нижче розташовані поверхи будівлі. Існуючі сьогодні вимоги пожежної безпеки недостатньо ефективні для повного забезпечення пожежної безпеки фасадних систем. Тому протипожежні заходи мають бути спрямовані на обмеження розповсюдження вогню, запобігання обвалення горючих уламків фасадних конструкцій та створення умов для швидкої та безпечної евакуації людей з палаючої будівлі до прибуття пожежно-рятувальних служб.

РОЗДІЛ 2. АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВИМОГ ПОЖЕЖНОЇ БЕЗПЕКИ ЗБІРНИХ СИСТЕМ ФАСАДНОЇ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЇ ЗОВНІШНІХ СТІН БУДИНКІВ І СПОРУД ТА МЕТОДІВ ЇХ ОЦІНЮВАННЯ

2.1 Аналіз національної нормативної бази щодо вимог пожежної безпеки до збірних систем фасадної теплоізоляції та методів їх оцінювання

На сьогоднішній день в Україні загальні вимоги пожежної безпеки до фасадних систем регламентовані Державними будівельними нормами ДБН В.1.1-7 [20].

Згідно зі зазначеними будівельними нормами, у будівлях першого ступеня вогнестійкості заборонено використовувати горючі матеріали для зовнішнього облицювання зовнішніх стін. У будівлях другого та третього ступеня вогнестійкості дозволяється використовувати матеріали групи горючості Г1 для зовнішнього облицювання, за виключенням випадків, визначених у відповідних будівельних нормах [20].

У будинках з умовною висотою не більше 26,5 метрів у внутрішніх шарах системи зовнішнього облицювання стін можна використовувати матеріали груп горючості Г1 та Г2. При цьому група горючості утеплювача і облицювання повинна оцінюватися шляхом проведення лабораторних випробувань за методом, вказаним в національному стандарті України ДСТУ 8829 [5].

У Державних будівельних нормах ДБН В.2.6-33 [19] розширено ці загальні вимоги, встановлені для групи горючості теплоізоляційних і опоряджувальних матеріалів, враховуючи конструктивне рішення (клас) фасадної системи. Згідно з цими нормами, якщо матеріали теплової ізоляції та опоряджувального шару належать до групи горючості НГ згідно з ДБН В.1.1-7 [20], то конструкції із фасадною теплоізоляцією можуть

використовуватися для будівель та споруд з умовною висотою понад 47 метрів без обмежень.

Конструкції, що містять шар теплової ізоляції з матеріалів групи Г1 і Г2 за ДБН В.1.1-7 [20], можуть використовуватися лише для будівель і споруд з умовною висотою менше 9 метрів, за винятком будівель та споруд дошкільних закладів освіти, закладів освіти, закладів охорони здоров'я, закладів для літніх людей згідно з ДБН В.2.2-3 [57], ДБН В.2.2-4 [58], ДБН В.2.2-10 [59], ДБН В.2.2-40 [60], ДБН В.2.2-18 [61], ДБН 363 [62] та будівель і споруд I ступеня вогнестійкості, а також для будівель і споруд II та III ступенів вогнестійкості, при застосуванні опоряджувального шару з матеріалів, які відносяться до групи помірної горючості Г2.

Згідно з будівельними нормами та нормативними документами України, збірні системи з опорядженням поділяються на класи відповідно до їх конструктивних особливостей (рис. 2.1) [31]:

- клас А – з штукатурками та дрібноштучними елементами;
- клас Б – з індустріальними елементами, дрібнорозмірними плитками або стіновими виробами;
- клас В – з світлопрозорими шарами та елементами [19].



Рисунок 2.1 – Класифікація збірних систем фасадної теплоізоляції залежно від конструктивного рішення [31]

В табл. 2.1 наведено можливість використання конструкцій фасадної теплоізоляції в залежності від висоти будівель та класу горючості теплоізоляційних та опоряджувальних матеріалів [19].

Таблиця 2.1

Застосування конструкцій із фасадною теплоізоляцією в залежності від їх конструктивного типу, висоти будівель та горючості матеріалів теплоізоляційного та опоряджувального шарів [19]

Конструктивна схема збірної системи згідно з додатками А–В	Умовна висота будівель H , м	Група горючості теплоізоляційного матеріалу			Група горючості опоряджувального матеріалу		
		НГ	Г1	Г2	НГ	Г1	Г2
А	$H < 9$	+	+	+	+	+ ¹⁾	+ ¹⁾
	$9 < H < 26,5$	+	+	+	+	+ ¹⁾	–
	$26,5 < H < 47$	+	–	–	+	–	–
	$H > 47$	+	–	–	+	–	–
Б	$H < 9$	+	+	+	+	+ ¹⁾	–
	$9 < H < 26,5$	+	–	–	+	+ ¹⁾	–
	$26,5 < H < 47$	+	–	–	+	–	–
	$H > 47$	+	–	–	+	–	–
В	$H < 9$	+	+	+	+	+ ¹⁾	+ ¹⁾
	$9 < H < 26,5$	+	+	–	+	+ ¹⁾	–
	$26,5 < H < 47$	+	–	–	+	–	–
	$H > 47$	+	–	–	+	–	–
Примітка. "+" означає можливість застосування. ⁺¹⁾ Встановлюється з урахуванням вищезазначених вимог.							

Конструкції з фасадною теплоізоляцією та опорядженням, що включають штукатурку або дрібноштучні вироби, можуть використовуватися для багатопверхових будівель з умовною висотою до 26,5 м, за умови застосування теплоізоляційних матеріалів групи низької горючості Г1 або групи помірної горючості Г2 відповідно до ДБН В.1.1-7

[20]. У разі використання теплоізоляційних матеріалів групи низької горючості Г1 або групи помірної горючості Г2 разом з опоряджувальними шарами з негорючих матеріалів, також застосовують пояси через кожні три поверхи та обрамлення віконних та балконних прорізів теплоізоляційними матеріалами завширшки, що не менше двох товщин використаної ізоляції.

Збірні системи, які включають ізоляційні комплекти з опорядженням, що складаються з індустриальних елементів, розробляються з урахуванням теплової ізоляції, яка прикріплюється до основи стіни, із створенням вентиляованого проміжку повітря між зовнішнім шаром та елементами обробки. Комплект включає в себе ізоляційний шар, захисний шар повітря, індустриальні елементи обробки, кріпильну конструкцію з несучими та з'єднувальними деталями, кронштейни, напрямні вироби, елементи для кріплення теплової та повітрозахисної оболонки, а також елементи для з'єднання з будівельними конструкціями будинку чи споруди.

Конструктивні схеми збірних систем фасадної теплоізоляції класу А поділяються на два підкласи (рис. 2.2, 2.3).

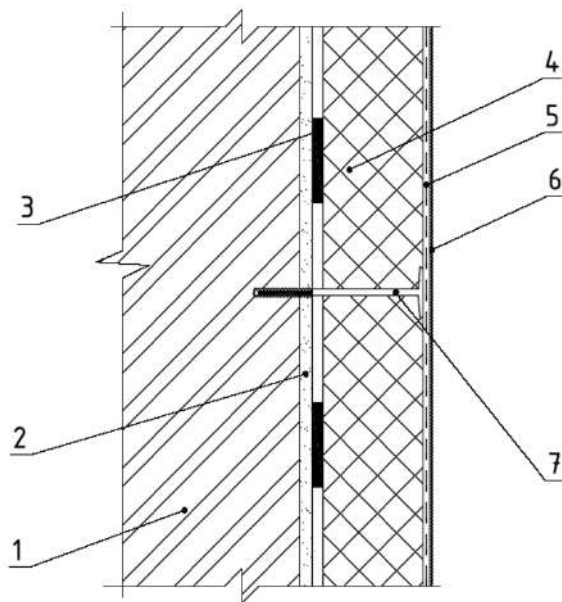


Рисунок 2.2 – Конструктивна схема зірної системи з опорядженням легкими тонкошаровими штукатурками [19]:

1 – несуча частина стіни; 2 – вирівнювальний штукатурний шар;

3 – клейовий шар; 4 – шар теплової ізоляції; 5 – захисний шар, армований склосіткою; 6 – опоряджувальне покриття; 7 – елемент механічного кріплення утеплювача

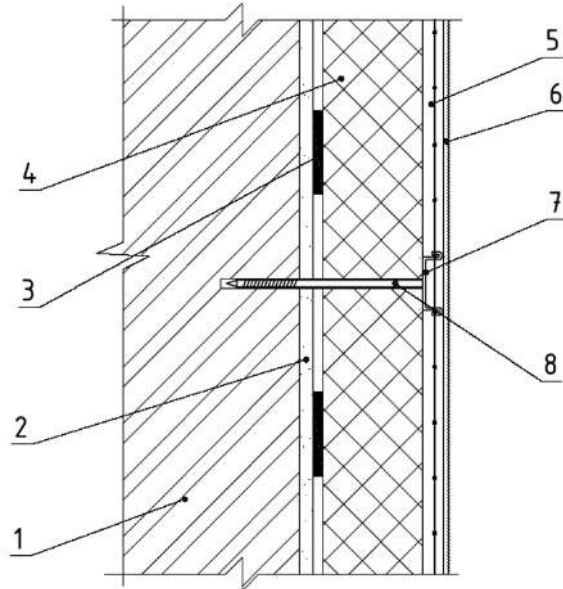


Рисунок 2.3 – Конструктивна схема збірної системи з опорядженням товстошаровими штукатурками [19]:

1 – несуча частина стіни; 2 – вирівнювальний штукатурний шар;

3 – клейовий шар;

4 – шар теплової ізоляції; 5 – захисний шар, армований металевою сіткою; 6 – опоряджувальне покриття; 7 – фіксатор металевої сітки;

8 – елемент механічного кріплення утеплювача

Такі збірні системи виконуються з тепловою ізоляцією, що закріплюється на несучій частині стіни, з нанесенням опоряджувального шару на поверхню шару теплової ізоляції. Комплект складається з клейових матеріалів, теплоізоляційного матеріалу, механічних засобів кріплення теплової ізоляції, армуючої сітки, опоряджувального покриття.

Конструкції з фасадною теплоізоляцією, що використовуюють індустріальні елементи з шаром негорючої теплової ізоляції та шаром личкувального матеріалу групи низької горючості Г1 згідно з ДБН В.1.1-7

[20], можуть бути застосовані для будівель з багатьма поверхами і висотою менше 26,5 м, за винятком будівель та споруд дошкільних закладів освіти, закладів освіти, закладів охорони здоров'я, закладів для літніх людей згідно з ДБН В.2.2-3 [57], ДБН В.2.2-4 [58], ДБН В.2.2-10 [59], ДБН В.2.2-40 [60], ДБН В.2.2-18 [61], ДБН 363 [62] та будівель і споруд I ступеня вогнестійкості, а також для будівель з різними рівнями вогнестійкості.

Такі збірні системи включають теплоізоляцію, яка кріпиться до несучої частини стіни з утворенням вентиляованого повітряного прошарку між її зовнішньою поверхнею та опоряджувальним шаром. Комплект складається з теплоізоляції, повітрозахисного шару, опоряджувальних індустриальних елементів, кріпильного каркасу з несучими та з'єднувальними елементами, кронштейнами, напрямними виробами, а також елементів кріплення тепло- і повітрозахисних шарів та елементів примикання до будівельних конструкцій будівлі або споруди.

Приклад конструктивної схеми збірної систем фасадної теплоізоляції класу Б представлено на рис. 2.4.

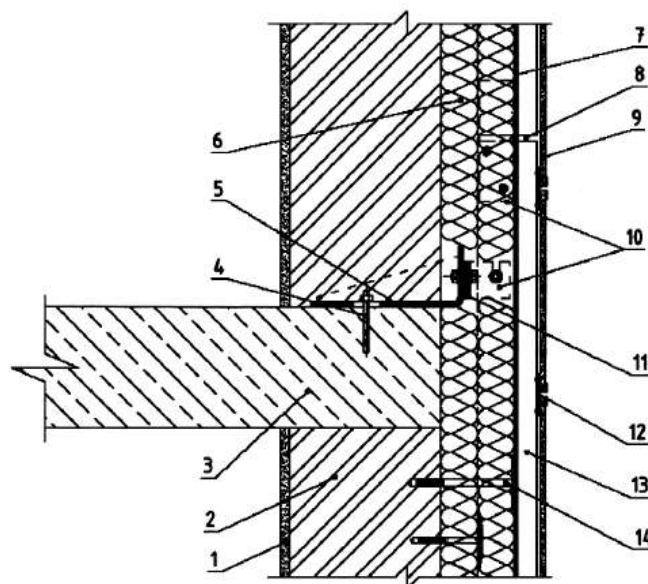


Рисунок 2.4 – Конструктивна схема збірної системи з з вентиляованим повітряним прошарком та непрозорим індустриальним опорядженням з одношаровою тепловою ізоляцією [19]:

1 - внутрішня штукатурка; 2 - несуча частина стіни; 3 - залізобетонна плита перекриття; 4 - анкер клиновий; 5 - кронштейн; 6 - шар теплової ізоляції; 7 - повітрозахисна мембранна плівка; 8 - повітряний вентильований прошарок; 9 - індустриальні личкувальні елементи (керамічні плити); 10 - з'єднуювальні елементи; 11 - прокладка; 12 - кляммер; 13 - стояк; 14 - елемент механічного кріплення утеплювача прошарок

Конструкції з фасадною теплоізоляцією, що мають прозорі елементи, та використовують теплову ізоляцію низької горючості Г1 згідно з ДБН В.1.1-7 [20], можуть застосовуватися для багатоповерхових будівель та споруд з умовною висотою до 26,5 м, за винятком деяких категорій будівель, таких як дошкільні заклади, заклади освіти, заклади охорони здоров'я, заклади для літніх людей та культурно-видовищні заклади з відповідними ступенями вогнестійкості. При умовній висоті більше 9 метрів обов'язково виконують пояси через кожні три поверхи та обрамлення віконних та балконних прорізів тепловою ізоляцією з негорючих матеріалів завширшки не менше двох товщин використаної ізоляції.

Такі збірні системи включають теплоізоляцію, яка може бути прикріпленою або самонесучою в межах поверху (ярусу), з утворенням повітряного прошарку між її зовнішньою поверхнею та захисним світлопрозорим шаром. Комплект включає світлопрозорі елементи; несучий каркас зі стояків, ригелів та елементів кріплення; а також непрозорі елементи з боку приміщення з тепловою ізоляцією.

Приклад конструктивної схеми збірної систем фасадної теплоізоляції класу В представлено на рис. 2.5.

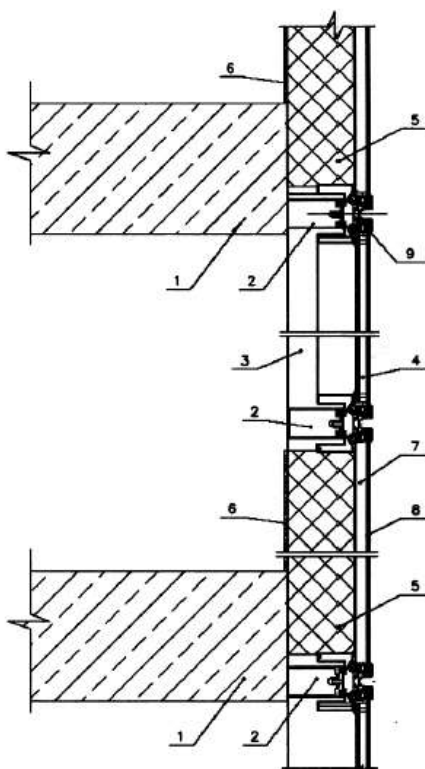


Рисунок 2.5 – Конструктивна схема збірної системи з комбінованим світлопрозорим фасадом [19]:

- 1 - плита перекриття; 2 - елементи несучого каркаса (ригель);
 3 - елементи несучого каркаса (стопки); 4 - склопакети (із сонцезахисним склом); 5 - утеплювач; 6 - внутрішня обшивка;
 7 - вентильований повітряний прошарок; 8 - опоряджувальний світлопрозорий шар; 9 - елемент кріплення опоряджувального шару

Також в ДБН В.2.6-33 [19] зазначається, що використання конструкцій з опорядженням штукатуркою з теплоізоляцією групи низької горючості Г1 і групи помірної горючості Г2 для будівель та споруд з умовною висотою понад 9 метрів можливе за умови, що фасадна теплоізоляція не сприяє поширенню вогню. Здатність комплекту або збірної системи до поширення вогню по фасаді оцінюється на основі результатів натурних вогневих випробувань, які проводяться до початку будівельно-монтажних робіт.

На підтримку ДБН В.2.6-33 [19] в Україні прийняті національні стандарти ДСТУ Б В.2.6-34 [63], ДСТУ Б В.2.6-35 [64] та ДСТУ Б В.2.6-36

[65], в яких зокрема, зазначена класифікація збірних систем, вимоги пожежної безпеки та періодичність проведення їх випробувань.

У ДСТУ Б В.2.6-35 [64], що застосовується до конструкцій зовнішніх стін з фасадною теплоізоляцією класів Б та В, вказується, що теплоізоляційні плити мають бути з негорючих (НГ) матеріалів відповідно до ДБН В.1.1-7 [20]. Внутрішній шар двошарової теплової ізоляції такої конструкції може складатися з мінераловатних плит груп горючості Г1, Г2, з густиною не менше 30 кг/м³. Опоряджувальні матеріали, які використовуються для улаштування конструкцій фасадної теплоізоляції для будинків I ступеня вогнестійкості, мають бути негорючими (НГ). Для будинків із ступенем вогнестійкості II, III, IIIа, IIIб, IV і IVа можна використовувати опоряджувальні матеріали, що мають групу горючості Г1 згідно з ДСТУ 8829 [56] та групу займистості В1 згідно з ДСТУ Б В.1.1-2 [66], з обов'язковим влаштуванням протипожежного поясу з негорючого матеріалу, товщиною, що дорівнює двом товщинам теплоізоляційного шару, через кожні три поверхи.

В ДСТУ Б В.2.6-36 [65], згідно з вимогами, що поширюються на конструкції зовнішніх стін із фасадною теплоізоляцією класу А, зазначено наступне:

1. У будинках до п'яти поверхів включно при використанні фасадної теплоізоляції класу А з пінополістирольних плит груп горючості Г1, Г2 згідно з класифікацією ДБН В.1.1-7 [20], слід передбачати обрамлення віконних і дверних прорізів стін, а також суцільний пояс на рівні третього поверху, виконані з негорючих теплоізоляційних матеріалів завширшки не менше двох товщин плити.

2. У багатоповерхових будинках до дев'яти поверхів включно з аналогічною теплоізоляцією, слід передбачати обрамлення віконних і дверних прорізів стін, а також суцільні пояси через кожні три поверхи, виконані з негорючих теплоізоляційних матеріалів завширшки не менше двох товщин плити.

3. У будинках дитячих дошкільних та навчальних закладів додатково необхідно передбачити суцільний пояс з негорючих утеплювачів завширшки не менше двох метрів від рівня вимощення.

У вищерозглянутих нормативних документах оцінювання пожежної небезпеки фасадних систем проводять за такими методами випробувань:

1. Негорючість (НГ) – згідно з 7.1 ДСТУ 8829 [56] за методами, визначеними в ДСТУ EN ISO 1716 [67] і ДСТУ EN ISO 1182 [68]. Будівельний матеріал відносять до групи негорючих за таких умов:

а) під час випробування згідно з ДСТУ EN ISO 1716 [67] значення вищої теплоти згоряння QPCS матеріалу не перевищує 2,0 МДж/кг ($QPCS \leq 2,0 \text{ МДж/кг}$);

б) під час випробування згідно з ДСТУ EN ISO 1182 [68]:

– значення підвищення температури $\Delta T = T_{max} - T_f$ для кожного з п'яти зразків, зареєстроване термопарою, встановленою в пічі, не перевищує 30 °C ($\Delta T \leq 30 \text{ °C}$);

– значення втрати маси у відсотках Δm для кожного з п'яти зразків не перевищує 50 % ($\Delta m \leq 50 \%$);

– відсутність стійкого полум'я для кожного з п'яти зразків ($t_f = 0 \text{ с}$).

2. Групу горючості (Г1 – Г4) – згідно з 7.4 ДСТУ 8829 [56]. Суть методу випробувань полягає у введенні одночасно чотирьох зразків, закріплених у тримачі, в камеру згоряння та дії на них полум'я від джерела запалювання з заданими параметрами (фіксовані витрати газу та повітря) протягом 10 хв й визначення для кожної з трьох серій випробувань таких параметрів горючості:

– температури димових газів (T);

– тривалості самостійного горіння (τ_{cz});

– ступеня пошкодження за довжиною (S_L);

– ступеня пошкодження за масою (S_m).

За результатами випробувань горючі (Г) будівельні матеріали в залежності від отриманих значень параметрів горючості, відносять до

однієї з чотирьох груп – Г1, Г2, Г3, Г4 відповідно до табл. 2.2. Якщо за різними параметрами матеріал має бути віднесений до різних груп горючості, то його відносять до більш небезпечної.

Таблиця 2.2

Класифікація будівельних матеріалів за горючістю

Група горючості матеріалів	Параметри горючості			
	Температура димових газів $T, ^\circ\text{C}$	Ступінь пошкодження за довжиною $S_L, \%$	Ступінь пошкодження за масою $S_m, \%$	Тривалість самостійного горіння $\tau_{\text{ср}}, \text{с}$
Г1	≤ 135	≤ 65	≤ 20	0
Г2	≤ 235	≤ 85	≤ 50	≤ 30
Г3	≤ 450	> 85	≤ 50	≤ 300
Г4	> 450	> 85	> 50	> 300

Примітка: Для матеріалів груп горючості Г1-Г3 не допускається утворення крапель розплаву, що горять під час випробувань.

3. Групу займистості (В1 – В3) згідно з ДСТУ Б В.1.1-2 [66]. Суть методу випробувань полягає у визначенні параметрів займистості матеріалу при заданих стандартом рівнях впливу на поверхню зразка променистого теплового потоку та полум'я від джерела запалювання. Поверхнева густина теплового потоку повинна перебувати у межах від 10 кВт/м² до 50 кВт/м². Для класифікації матеріалів за групами займистості визначають критичну поверхневу густина теплового потоку (КПГТП) та проміжок часу від початку випробування до займання зразка. За результатами випробувань горючі будівельні матеріали залежно від значення критичної поверхневої густини теплового потоку відносять до однієї з трьох груп – В1, В2, В3 відповідно до табл. 2.3.

Таблиця 2.3

Класифікація будівельних матеріалів за займистістю

Група займистості матеріалу	КПГТП, кВт/м ²
В1	$35 \leq \text{КПГТП}$
В2	$20 \leq \text{КПГТП} < 35$
В3	$\text{КПГТП} < 20$

4. Здатність поширювати вогонь по зовнішній поверхні - згідно з «Методикою натурних вогневих випробувань теплоізоляційно-оздоблювальних систем зовнішніх стін будинків і споруд на поширення вогню УкрНДПБ МНС України» [69]. Сутність методу випробувань полягає у визначенні розмірів пошкодження і значення підвищення температури у теплоізоляційній оздоблювальній системі (ТОС), що нанесена на фрагмент двоповерхового будинку, на першому поверсі якого (у вогневій камері) створюється протягом 30 хв температурний режим, наближений до стандартного за ДСТУ Б В.1.1-4* [70].

Слід також наголосити, що окрім зазначеної методики, в Україні методи оцінки пожежної небезпеки конструкцій зовнішніх стін з фасадною теплоізоляцією також визначені в національних стандартах ДСТУ Б В.1.1-21 [71] та ДСТУ Б В.1.1-22 [72], які гармонізовані з відповідними міжнародними стандартами з національними відхилами, і чинні з 2009 року. Але протягом 10 останніх років, методи випробувань, що наведені в цих двох стандартах, не знайшли практичної реалізації в Україні.

Також, враховуючи прагнення України до інтеграції в європейську спільноту, на даний час в державі розроблено та впроваджено Технічний регламент будівельних виробів, будівель і споруд [73], згармонізований з Регламентом (ЕС) № 305/2011 Європейського парламенту від 9 березня 2011 року.

Даний регламент базується на положеннях Директиви Ради Європи 89/106/ЄЕС від 21 грудня 1988 року про зближення законів, підзаконних актів та адміністративних положень держав - членів стосовно будівельних виробів. У підтримку цієї директиви, як тлумачний документ, в Україні прийнято ДБН В.1.2-7 [24]. Відповідно до [5], вироби та матеріали, які забезпечують пожежну безпеку будівлі, повинні проходити процедуру оцінки відповідності в рамках обраних систем відповідності згідно стандартизованих методів. Ці методи повинні враховувати положення будівельних норм щодо нормованого теплового впливу на зразок, а також

переліку та критеріїв основних характеристик, які забезпечують пожежну безпеку виробу або матеріалу.

Для зовнішніх стін з фасадною тепловою ізоляцією для обмеження поширення вогню та диму з одного протипожежного відсіку в інший по пустотах усередині фасадів і по зовнішній поверхні фасадів необхідно визначати характеристики щодо «реакції на вогонь» їх складових, в Україні ця вимога визначена в [19] та в ДСТУ-Н Б ЕТАГ 017:2013 [74], а також «здатності поширювати вогонь» фасадної системи в цілому. Зокрема, оцінювання «здатності поширювати вогонь» фасадних систем може бути здійснено шляхом проведення середньомасштабних і великомасштабних випробувань за стандартами ДСТУ Б.В.1.1-21 [71] та ДСТУ Б.В.1.1-22 [72]. Однак, на сьогоднішній день, в будівельних нормах України відсутні вимоги до показників щодо «реакції на вогонь», в тому числі і до складових фасадної теплової ізоляції.

2.2 Аналіз протипожежних заходів у конструкціях зовнішніх стін із фасадною теплоізоляцією

Запобігання фасадним пожежам та поширенню пожежі вертикальними будівельними конструкціями є одним із важливих завдань із забезпечення виконання вимог Закону України від 05.11.2009 № 1704-VI «Про будівельні норми» [4], зокрема в частині забезпечення вимог з обмеження поширення вогню на сусідні будівлі і споруди та поширення вогню і диму всередині об'єкта. Визначення закономірностей зміни температури під час пожежі на поверхні вертикальних будівельних конструкцій для можливості прогнозування запобігання поширенню вогню по фасаду може бути підґрунтям для удосконалення вимог пожежної безпеки для фасадних систем будівель, що обумовлює необхідність аналізу існуючих конструктивних типів основних фасадних систем [12].

Для зменшення ризику поширення пожеж у будівлях, відповідно до вимог [19, 75], проектують і встановлюють автоматичні системи протипожежного захисту, такі як системи пожежогасіння, пожежної сигналізації та протидимного захисту, а також протипожежні бар'єри, зони, відсіки, тамбур-шлюзи, пояси, розриви тощо. У конструкціях зовнішніх стін з фасадною теплоізоляцією та опорядженням штукатуркою, де для теплоізоляції використовують матеріали груп низької горючості Г1 і помірної горючості Г2 (такі як пінополістирол тощо), а опоряджувальний шар складається з негорючих матеріалів і матеріалів групи низької горючості Г1, для будівель з висотою до 26,5 м обов'язково влаштовують протипожежні пояси з теплоізоляції негорючих матеріалів (наприклад, мінеральна вата), завширшки не менше, ніж дві товщини використаної ізоляції [19]. Ці протипожежні пояси встановлюються по всьому периметру будівлі, і крім цього передбачаються обрамлення віконних та балконних відкриттів також з негорючих матеріалів [3].

В роботі [76] представлено результати кількох досліджень, отриманих за допомогою програми FDS (версія 4.0 Fire Dynamics Simulator), які

порівнюються з експериментальними даними. Метою роботи була перевірка можливостей програми FDS щодо моделювання поширення полум'я, а також визначення оптимальних значень параметрів матеріалу горючого навантаження для інженерного використання FDS. Експериментальні дослідження включали в себе проведення випробувань за ISO 5660-1:2015 [77], а також повномасштабні випробування на поширення вогню відповідно до ISO 9705-1:2016 [78].

В роботі [79] було розглянуто проблеми, пов'язані із пожежною небезпекою конструкцій зовнішніх стін із фасадною теплоізоляцією з опорядженням штукатуркою. Проведено натурні вогневі випробування конструкції зовнішньої стіни із фасадною теплоізоляцією з опорядженням штукатуркою на поширення вогню, де в якості теплоізоляційного матеріалу використовували пінополістирол марки «ПСБ-С-25», середньою товщиною 150 мм. Виконано комп'ютерне моделювання динаміки пожежі за допомогою FDS, а отримані чисельні результати порівняно із експериментальними даними для перевірки можливості використання програмного забезпечення щодо відтворення реальних умов пожежі у житлових будинках. Експериментальні дослідження були проведені за стандартизованою методикою, яка полягала у визначенні розмірів пошкодження теплоізоляційно-оздоблювальної системи і підвищення температур всередині неї внаслідок вогневої дії. Проте в дослідженнях не було враховано варіації параметрів фасаду та наявність протипожежної перешкоди, що обумовлено методикою натурних вогневих випробувань.

У роботах [80, 81] експериментальним та чисельним шляхом досліджено вогнестійкість фасадних конструкцій. Експериментальна установка імітувала триповерховий житловий будинок із зовнішньою теплоізоляційно-оздоблювальною системою. Авторам вдалося у моделі відтворити належним чином реальні умови випробування, однак температури, близькі до реальних умов пожежі, не могли бути належним

чином відтворені. Причиною розбіжностей значень температур були складнощі, пов'язані з відтворенням у FDS модельного вогнища.

В роботі [82] було експериментально та чисельно досліджено динаміку розвитку пожежі у випробувальному стенді для фасадних конструкцій. Експериментальна установка моделювала триповерховий житловий будинок (висотою 6,7 м, шириною 4 м і глибиною 1,6 м) із зовнішнім облицюванням стін. Чисельна модель була розроблена в програмі Fire Dynamics Simulator (FDS) з аналогічною геометрією та вимірювальною апаратурою. Дослідження проводили для конструкцій зовнішніх стін із фасадною теплоізоляцією для двох різних типів облицювань стін. Проте, в роботі не було досліджено технічних рішень для запобігання поширення пожежі поверхнею фасаду будівлі через незмінну геометрію віконного отвору випробувального стенду та неможливість зміни конфігурації фасадних систем. Це було зумовлено методикою випробування.

Загальні особливості вогневого випробування були добре відтворені в числовій моделі, однак температури поблизу джерела вогню не могли бути належним чином відтворені. Причиною цього було те, що отримані значення температури чисельної моделі були значно завищені через похибки випромінювання.

У дослідженні [83] проведено порівняльний аналіз між повномасштабними фасадними випробуваннями, які були виконані за методиками SP Fire 105 [84] (шведська) та BS 8414-1 [85] (британська). Автори спробували відтворити консистентність отриманих результатів експериментальних досліджень у числовій моделі та використовувати комп'ютерне моделювання для аналізу впливу змін у експериментальних умовах. У представлених дослідженнях враховано різні варіанти вогневого навантаження, пожежного навантаження та видів палива. Використання моделювання у програмі FDS не дозволило авторам повністю відтворити експериментально виміряні значення температури у всіх аспектах. Тим не

менше, зроблено висновок, що застосування комп'ютерного моделювання може зменшити потребу у ресурсозатратних повномасштабних випробуваннях, які супроводжуються значними витратами коштів.

Проте авторами не досліджувалося впливу протипожежних перешкод на ефективність запобігання поширенню пожежі поверхнею фасадної системи, що пояснюється технічними характеристиками випробувальних установок. Результати експериментальних досліджень показали, що відтворюваність результатів, як в методиці BS 8141-1, так і в SP Fire 105, є сумнівною. Причиною цього були різні види палива (деревина та гептан), яке використовувалися в процесі дослідження, а також різна геометрія камер згоряння. Таким чином, неможливо було контролювати тепловий вплив на поверхні фасаду, який відрізнявся через різні фактори (товщина випробувальних зразків; рух повітряних потоків, який впливав на значення температури) тощо. Для того, щоб забезпечити надійний, повторюваний і відтворюваний метод випробування фасадів, необхідно було вирішити ці проблемні питання.

У [86] проведено випробування фасадної системи згідно з методикою, яка вимагається французькою технічною специфікацією LEPiR 2-2010 «Facade fire propagation test». Дослідження було спрямоване на зменшення ризиків поширення пожежі фасадами на верхні рівні. Використовувалась моделювання динаміки пожежі за допомогою програми FDS для двох повномасштабних експериментів, проведених лабораторією Efectis France. Основна мета дослідження полягала у визначенні здатності чисельної моделі відтворювати кількісні показники температури газу та теплового потоку на тестовому фасаді для подальшої оцінки впливу вогню на фасадну теплоізоляцію. Порівняння експериментальних даних з результатами чисельних розрахунків показало задовільну відповідність температури та теплового потоку (HRR). Дослідженнями не було враховано можливої зміни значень теплового потоку, що пояснюється відсутністю можливості використання різних типів модельних вогнищ

пожежі. Для обмеження ризиків поширення пожеж не досліджувався кут нахилу площини фасаду, що пояснюється конструктивними особливостями випробувального стенду фасаду.

В роботі [40] наведено результати досліджень впливу конструктивних параметрів фасадних протипожежних карнизів на межі протипожежних відсіків на запобігання поширенню пожежі у висотних будинках за допомогою застосування FDS-моделювання. Результати показали, що наявність протипожежного карниза знижує фактичну температуру на рівні верхнього поверху під яким виникла пожежа фактично на 45–47 %. Проте залишилися невирішеними питання дослідження впливу параметрів міжповерхового віконного простінку за наявності або відсутності протипожежного карнизу на поширення пожежі.

У роботах [87, 88] представлено дослідження впливу ефекту балкона на поширення вогню через зовнішні вікна на верхні поверхи. Було проаналізовано три різні конфігурації над віконним прорізом: без балкона, з балконом однакової ширини з віконним прорізом та з балконом шириною на 1 м більшою з кожного боку віконного прорізу. Експериментальні випробування з вогнем були чисельно змодельовані за допомогою FDS. Результати порівнювалися між собою для обох методів дослідження. На основі отриманих даних зроблено висновки та запропоновано найбільш ефективне конструктивне рішення для обмеження поширення вогню через поверхню фасадних систем.

У дослідженні [89] проведено аналіз впливу пожежних перешкод на розповсюдження вогню через вентилявані фасади. Виявлено, що наявність вертикальних перешкод сприяла зниженню ризику поширення вогню, оскільки ізоляція за такими перешкодами залишалася цілісною. Вертикальні перешкоди здатні утримувати горизонтальне розповсюдження вогню в залежності від типу ізоляції. Отримані результати експерименту стануть основою для подальших досліджень впливу пожежних перешкод на розповсюдження вогню по поверхні фасадних систем.

Застосування пасивних заходів для уникнення вертикального розповсюдження вогню було проаналізовано в [90] за допомогою програмного забезпечення FDS. Дослідження включало в себе етапи валідації та порівняльний аналіз. Отримані авторами результати свідчать, що встановлення горизонтального протипожежного карнизу шириною 60 см на фасадних конструкціях забезпечує ефективніший захист від пожежі у порівнянні з конструкцією без карниза.

Мета дослідження, описаного у роботі [91], полягала в аналізі та порівнянні ефективності горизонтальних карнизів над незахищеними віконними отворами на фасаді будівлі. Виявлено, що версія FDS 6.2.0 відмінно підходить для розрахунків у даному випадку, враховуючи надані параметри. Головними висновками є те, що використання горизонтальних карнизів шириною не менше 60 см призводить до зниження наслідків та зменшення ризику на фасаді під час пожежі. Моделювання карнизів шириною 20 см і 30 см не принесло задовільних результатів. Застосування карнизів шириною 60, 80 та 100 см призвело до зниження температури на поверхні фасаду на 1,2 м над віконними отворами на 15–50%.

Проведений аналіз закордонних будівельних норм та наукових досліджень ефективності протипожежних карнизів показав відсутність рекомендацій або єдиного підходу щодо конструктивних параметрів протипожежних карнизів, які передбачаються на фасаді висотної будівлі. Окрім того, що згідно з [53] значення довжини захисної конструкції не повинно становити менше 1,2 м. Однак цей параметр не було експериментально підтверджено.

Наукові дослідження процесів обмеження поширення пожежі по фасадам будівель [92] дали змогу розкрити взаємозв'язки розповсюдження пожежі в залежності від параметрів світлових прорізів та наявності міжповерхових віконних простінків на фасаді будівлі.

Окремо слід відмітити роботу [93] щодо дослідження ефективності «горизонтальних виступів» за межі зовнішньої огорожувальної

конструкції будівлі, які в майбутньому отримали термін протипожежні карнизи. За результатом натурних випробувань отримано залежності зміни значень теплового потоку на рівні 1 м над віконним отвором. Ширина протипожежного карнизу становила: 0,0 м; 0,3 м; 0,6 м та 1 м. Питоме тепловиділення від модельної імітаційної пожежі становило 300 кВт/м^2 . На основі проведених натурних випробувань було визначено, що для фасаду з протипожежним карнизом шириною 0,3 м значення теплового потоку зменшувалося в середньому на 50 %. Для протипожежного карнизу шириною 0,6 м – на 60 %, а для протипожежного карнизу шириною 1,0 м – на 75 %. Отримані залежності дали змогу оцінити ефективність протипожежного карнизу, разом із цим, залишається невирішеним питання щодо оцінки взаємозв'язку між розміром віконного міжповерхового простінку та параметрами ширини самого карнизу.

В роботі [92] за основу прийнято висоту міжповерхового простінку 1 м, що на той час в тій чи іншій мірі відповідало архітектурним тенденціям. На даний час розміри вікна можуть варіюватися від стандартних 1470×1460 мм до суцільного заповнення склом прорізу в межах поверху, а саме від підлоги до перекриття (панорамні вікна).

Проведений аналіз наукових досліджень поширення пожежі поверхнею фасадів будівель показав відсутність єдиного підходу щодо їх конструктивних параметрів та протипожежних перешкод, які обмежують поширення вогню поверхнею фасаду. Враховуючи вимоги ДБН В.2.2-41:2019 [94] та ДБН В.1.1-7:2016 [20], доцільним є дослідження конструктивних параметрів протипожежних перешкод, як чинника впливу на запобігання поширенню пожежі на поверхні фасаду.

З урахуванням широкого спектру досліджень вітчизняних і зарубіжних науковців слід зауважити, що на сьогоднішній день існує обмежена кількість досліджень, присвячених особливостям створення протипожежних поясів із негорючих матеріалів для конструкцій зовнішніх стін з фасадною теплоізоляцією та опорядженням штукатуркою. Крім того,

актуальним науково-технічним завданням є розробка конструктивних рішень з метою обмеження поширення вогню по поверхні фасадної системи теплоізоляції з горючим утеплювачем, спрямована на запобігання постраждалим та мінімізацію наслідків пожежі.

Використання негорючих плит з мінеральної вати для утворення протипожежних поясів у конструкціях зовнішніх стін із фасадною теплоізоляцією дозволяє обмежити поширення вогню або, щонайменше, знизити швидкість його розповсюдження по поверхні фасаду. Додатковим вимогам до цих заходів є обов'язкове створення обрамлення навколо віконних та дверних отворів з негорючих теплоізоляційних матеріалів. Відповідні протипожежні заходи можуть забезпечити цілісність фасадної теплоізоляції під час пожежі, але лише за умови належної технічної реалізації. Використання горючих матеріалів для цих цілей, а також помилки під час проектування та встановлення значно підвищують ризик пожежі в будівлях з фасадною теплоізоляцією.

У національних нормативних документах недостатньо детально описана процедура облаштування протипожежних поясів та обрамлення навколо віконних і дверних прорізів. Часто трапляються випадки неправильного тлумачення або повного ігнорування вимог нормативів щодо влаштування систем фасадної теплоізоляції. Це може бути наслідком браку досвіду у виконавців, що виконують ці роботи, або ж свідомого нехтування правилами пожежної безпеки з метою економії коштів під час будівництва. Тому проведення аналізу протипожежних заходів у конструкціях зовнішніх стін з фасадною теплоізоляцією та штукатуркою, а також вивчення особливостей їх облаштування з урахуванням досвіду інших країн є актуальною задачею.

Однією з найважливіших передумов для безпечного монтажу сучасних конструкцій зовнішніх стін з фасадною теплоізоляцією та облицюванням штукатуркою є дотримання вимог пожежної безпеки, які визначені в національних нормативних документах та технічних умовах.

Це особливо важливо для встановлення протипожежного поясу, як ключового елемента фасадної системи на межі протипожежних відсіків.

У країнах Європейського Союзу встановлені положення, які регламентують заходи щодо запобігання можливого поширення вогню під час пожежі в будівлях, особливо в тих, де використовується конструкція зовнішніх стін з фасадною теплоізоляцією та облицюванням штукатуркою [53]. Ці нормативи вимагають встановлення протипожежних поясів із негорючих матеріалів у випадках використання утеплювачів із горючих матеріалів, або ж застосування негорючих утеплювачів у будівлях, де існує великий ризик для життя людей, які можуть бути неспроможні самостійно евакуюватися під час пожежі (наприклад, житлові будинки, лікарні, дитячі садки, школи, будинки для літніх людей тощо). Такі самі вимоги враховані у національних стандартах та будівельних нормах, які передбачають впровадження європейських стандартів з енергомодернізації фасадів житлових будинків [19, 65].

Згідно [19], при використанні класу А у фасадній системі, де теплова ізоляція належить до групи Г1 або Г2, та має опоряджувальний шар із негорючих матеріалів, а також у будівлях від 9 м до 26,5 м включно, обов'язково слід враховувати наявність протипожежних поясів через кожні три поверхи та обрамлення віконних та балконних прорізів тепловою ізоляцією завширшки не менше дві товщини використаної ізоляції.

Для класу Б, який використовує індустриальні елементи, зі шаром теплової ізоляції з негорючих матеріалів, не потрібні протипожежні пояси або обрамлення віконних та балконних прорізів [19].

У фасадних системах класу В з використанням прозорих елементів, застосування теплової ізоляції групи Г1 в будівлях з умовною висотою понад 9 м вимагає протипожежних поясів через кожні три поверхи та обрамлення віконних та балконних прорізів тепловою ізоляцією завширшки не менше дві товщини використаної ізоляції [19].

Однак у національних будівельних стандартах не уточнено необхідність створення протипожежних заходів для дверних отворів на перших поверхах, внутрішніх кутів зовнішніх стін будівель, вертикальних меж протипожежних відсіків тощо [3].

З метою запобігання розповсюдженню пожежі в фасадах з полімерними утеплювачами та штукатуркою, передбачаються такі заходи [3]:

встановлення протипожежних поясів навколо віконних, балконних та вентиляційних отворів, які складаються з негорючих плит з мінеральної вати з густиною не менше 120 кг/м^3 . Ширина поясів повинна бути не менше 150 мм, а товщина - не менше загальної товщини плити для утеплення;

улаштування відкосів із негорючих плит з мінеральної вати шириною не менше 1 метра навколо евакуаційних виходів з будівлі;

розміщення горизонтальних і вертикальних протипожежних поясів з негорючих плит з мінеральної вати навколо периметру фасаду будівлі, зазвичай через кожні три поверхи;

створення протипожежних поясів внутрішніх кутів будівлі, де є віконні отвори, з використанням негорючих плит з мінеральної вати.

Згідно з [3], поверхові протипожежні пояси та обрамлення віконних (дверних) прорізів з негорючих плит з мінеральної вати відіграють важливу роль у забезпеченні пожежної безпеки будівлі. Це зумовлено наступним:

такі протипожежні пояси та обрамлення забезпечують кріплення оздоблювально-захисного шару штукатурки на фасадній теплоізоляції будівлі під час пожежі;

наявність горизонтальних поверхових протипожежних поясів запобігає поширенню всередину системи теплоізоляції горючих газів, нагрітих до високих температур. Це виключає можливість усадки пінополістиролу в системі фасаду;

обрамлення віконного прорізу приміщення, з якого поширюється полум'я, запобігає нагріванню пінополістиролу до температури, що викликає термодеструкцію, обмежуючи можливість потрапляння горючих газів у факел пожежі;

протипожежні пояси та обрамлення віконних (дверних) прорізів з мінеральної вати забезпечують цілісність конструкцій зовнішніх стін із фасадною теплоізоляцією та оздобленням штукатуркою під час пожежі, за умови правильного виконання робіт з їх облаштування.

Якщо ж у конструкції фасадної теплоізоляції з горючим утеплювачем не передбачені елементи з негорючої мінеральної вати, то пожежна небезпека таких конструкцій значно зростає, особливо при використанні полімерних штукатурок в оздоблювально-захисному шарі [3].

Перелічені протипожежні заходи у конструкціях зовнішніх стін з фасадною горючою теплоізоляцією перш за все призначені для забезпечення необхідного часу безпечної евакуації людей з будівлі, недопущення поширення пожежі на весь периметр будівлі та забезпечення безпечної роботи персоналу пожежно-рятувальних підрозділів [31].

Пожежна небезпека навісних вентильованих фасадних систем (НВФС) зумовлена нехтуванням протипожежних заходів [11]. Однією з причин цього є економія коштів на етапі будівництва об'єктів, використання дешевих оздоблювальних матеріалів, які не мають відповідних сертифікатів якості, та порушення правил пожежної безпеки під час монтажу і встановлення НВФС. Очевидно, що для підвищення пожежної безпеки будівель з вентильованими фасадними системами необхідно розробити додаткові протипожежні заходи. Ці заходи повинні ґрунтуватися на дослідженні умов поширення полум'я по фасадних конструкціях, оцінці пожежної небезпеки їх елементів, удосконаленні методів випробувань фасадних систем, а також на розробці способів зниження пожежної небезпеки та підвищення вогнестійкості як систем

загалом, так і їх окремих елементів у комплексі з іншими протипожежними заходами будівлі [95].

Для обмеження поширення пожежі в конструкціях навісних вентильованих фасадних систем використовуються активні та пасивні заходи протипожежного захисту. До активних заходів належать автоматичні системи пожежогасіння або системи водяного зрошення світлопрозорих конструкцій НВФС. Пасивні заходи включають конструктивні рішення, що перешкоджають виходу полум'я на поверхню фасаду або його локалізують, такі як вогнестійкі фасади, вертикальні міжповерхові пояси, спеціальні вогнестійкі бар'єри, що запобігають поширенню пожежі на суміжні поверхи, пожежні розсічки та горизонтальні протипожежні карнизи. Найбільш надійними та ефективними є пасивні методи, оскільки на їхню захисну функцію не впливають зовнішні фактори, такі як довговічність, можливість відмови або ремонтпридатність [96, 97].

Найпоширенішою причиною пожеж НВФС є займання вітрозахисної плівки (мембрани), яка розташована під шаром облицювання. За таких умов вогонь швидко охоплює весь фасад. Майже всі мембрани, незалежно від матеріалу, відносяться до класу горючих і є додатковим чинником для пожежної небезпеки будівель. Через цю обставину фахівцями рекомендовано за можливості обмежувати використання вітрозахисної мембрани, оскільки сучасні теплоізоляційні матеріали додаткового вітрозахисту не потребують.

Якщо мембрани все ж використовуються в конструкції фасадних систем, тоді рекомендовано вздовж усього периметра будівлі облаштовувати горизонтальні розсічки. Пожежна розсічка – це металева пластина, яка виготовлена з тонколистової сталі товщиною не менше 0,6 мм, і довжиною не менше 6 м. Встановлюється вона із заданим кроком по висоті для запобігання потрапляння розплавлених крапель на горючі матеріали під час виникнення пожежі [98].

Наступною причиною поширення вогню може стати облицювання, зокрема алюмінієві композитні панелі, які найчастіше використовуються у навісних фасадних системах. Недорогі композитні панелі із середнім шаром на основі поліетилену відносяться до групи горючості Г4 і займаються за температури 120 °С. Продукти горіння такого виду облицювання містять токсичні речовини. Альтернативою можуть стати матеріали зі сталі із полімерним покриттям (фасадні касети, лінеарні панелі). Однак вони досить трудомісткі з точки зору монтажу і мають здатність до корозії [99].

Пожежну безпеку облицювання навісних панелей може забезпечити негорючий керамограніт, але плити з нього мають велику вагу. Під час пожежі можуть виникнути тріщини, що призведуть до порушення цілісності покриття. У разі використання таких панелей частина фасаду може обвалитися. Для того, щоб руйнування не призводило до обвалу плит, вживаються спеціальні заходи, спрямовані на збільшення кількості кріплень [100].

Ще одним інженерним рішенням, що застосовується для захисту фасадів, є влаштування протипожежних штор для захисту віконного отвору. Принцип роботи протипожежної штори заснований на опусканні вогнестійкого полотна по всій площі віконного отвору, тим самим обмежуючи тепловий вплив на світлопрозоре заповнення. Спонукальний сигнал на привод протипожежної штори надходить від системи автоматичної пожежної сигналізації [101-105].

Рекомендованими заходами для підвищення пожежної безпеки, а також забезпечення необхідної межі вогнестійкості конструкцій навісних вентильованих фасадних систем, будуть [106-108]:

зрошення водою світлопрозорих конструкцій фасадних систем на рівні поверху, де виникла пожежа;

використання протипожежних екранів та вогнезахисних облицювань для елементів кріплення конструкції фасаду з метою зниження температури полум'я зовнішньої пожежі;

розміщення внутрішніх порожнин декоративних елементів вогнезахисних поясів та захист цих порожнин для запобігання поширенню полум'я;

використання інженерних заходів, таких як вертикальні міжповерхові пояси, спеціальні вогнестійкі бар'єри, пожежні розсічки та горизонтальні протипожежні карнизи, для обмеження поширення пожежі на вище розташовані поверхи протягом не менше ніж 60 хвилин;

застосування засобів вогнезахисту для кріпильних елементів світлопрозорих конструкцій фасаду з межею вогнестійкості не менше ніж R 60;

використання вогнестійкого скла з межею вогнестійкості не менше ніж E 60.

Таким чином, проблема забезпечення пожежної безпеки фасадних систем є складним науково-технічним завданням. Запропоновані інженерні рішення повинні бути обґрунтовані та підтверджені проведенням чисельних розрахунків, із використанням сучасного методу математичного моделювання за допомогою програмного комплексу Fire Dynamics Simulator (FDS) [109], а також проведенням вогневих випробувань елементів конструкцій фасадних систем.

2.3 Аналіз європейської та міжнародної нормативної бази щодо вимог пожежної безпеки до збірних систем фасадної теплоізоляції зовнішніх стін будинків і споруд та методів їх оцінювання

Більшість положень цього підрозділу підготовлено із використанням даних, наведених у проєкті, який стосується розроблення європейського підходу до оцінки пожежонебезпечності фасадів [95].

Одним із питань, яке було досліджене в рамках проєкту [95], є питання стосовно тлумачення терміну “фасад”, адже його визначення може бути різним у нормативних документах країн-респондентів. У результаті вивчення цього питання встановлено, що термін “фасад” вживається у нормативних документах досить нечасто. Частіше вживаними термінами є “зовнішня стіна”, “кладка” або інші подібні слова. Разом з тим, авторами проєкту запропоновано робоче визначення терміну “фасад”, а саме: “Готова зовнішня стінова конструкція будь-якого типу (масивна стіна, ненесуча зовнішня стіна тощо) або будівельна конструкція (кладка, горючий матеріал і т. ін.)” [26].

Пропоноване визначення з певними незначними уточненнями було прийнятне для більшості країн. З 24 країн 12 відповіли “так”. Тобто це робоче визначення відповідає їх національній системі. У Швейцарії, Німеччині та Австрії нормативні документи встановлюють розрізнення між зовнішньою стіною і кладкою, для яких існують різні вимоги. У шведських нормативних документах ідеться про зовнішню стіну. У бельгійських нормах ідеться про зовнішню стінову конструкцію або будь-який тип конструкції, що не виконує функції витримування навантаження [26].

Другим питанням, яке було досліджене в рамках проєкту [95], є питання нормативного врегулювання показників пожежонебезпечності фасадів та методів їх оцінювання. У результаті його вивчення встановлено, що в наведених у табл. 2.4 країнах наявні нормативні документи та/або настанови щодо показників пожежонебезпечності фасадів. Ці нормативні

документи в основному відповідають існуючій європейській системі класифікації за «реакцією на вогонь» і «вогнестійкістю», визначеної у [110, 111].

Разом з тим, ряд країн мають додаткові вимоги, на які не поширюється система класифікації за «реакцією на вогонь» та/або за «вогнестійкістю», а в окремих країнах також визначено, що потрібно користуватися специфічним методом випробування фасадів. Загалом було виявлено 12 таких методів випробування, інформацію щодо яких, наведено у табл. 2.4.

Таблиця 2.4

Додаткові методи випробувань фасадів, що застосовуються в Європі [26]

Методи випробування	Країни, які користуються методом випробування
PN-B-02867:2013 [112]	Польща
BS 8414-1:2015 та BS 8414-2:2015 [85, 113]	Великобританія, Республіка Ірландія
DIN 4102-20-2017 [114]	Швейцарія, Німеччина
ÖNORM B 3800-5:2013 [115]	Швейцарія, Австрія
Prüfbestimmung für Aussenwandbekleidungssysteme [116]	Швейцарія/Ліхтенштейн
Technical regulation A 2.2.1.5 [117]	Німеччина
LEPIR 2 [118]	Франція
MCZ 14800-6:2009 [119]	Угорщина
SP Fire 105 [84]	Швеція, Норвегія, Данія
Engineering guidance 16 (неофіційний метод) [120]	Фінляндія
ISO 13785-2:2002 [121]	Словаччина
ISO 13785-1:2002 [122]	Чеська Республіка

Згідно з табл. 2.4, чотири із наведених додаткових методів випробувань фасадів визначаються як випробування з помірним тепловим впливом, тоді як решта вісім – як випробування з потужним тепловим впливом. Два з цих випробувань імітують пожежі поза межами будівель, тоді як інші методи передбачають сценарії пожеж всередині будинку, коли вплив на фасад вогнем відбувається крізь прорізи (вікна, двері тощо).

Під час цих випробувань фіксуються та враховуються такі процеси та явища: розповсюдження вогню у вертикальній і горизонтальній площині на поверхні та всередині фасадної системи; розповсюдження пожежі з одного приміщення в інше (що розташоване вище); з'єднання фасаду з перекриттями; віконні конструкції; елементи огороження віконних прорізів; наявність горіння матеріалів; наявність обвалившихся фрагментів матеріалів системи; наявність диму; тепловий потік; незворотні зміни в фасадній системі [26].

Три схожі середньомасштабні методи випробування, що встановлені (DIN 4102-20 [114], ÖNORM B 3800-5 [115] та ISO 13785-1 [122]), ґрунтуються на сценарії пожежі, що розвивається всередині будинку, а також впливові вогню, що проникає крізь проріз, на фасад безпосередньо над прорізом. Четверте середньомасштабне випробування згідно PN-B-02867 [112], яким користуються в Польщі, передбачає пожежу поза межами будинку [33].

Інші вісім методів випробувань, є великомасштабними, які передбачають пожежу у стані повного розвитку всередині будинку з проникненням вогню крізь проріз [33].

Крім того, шість методів випробування передбачають використання випробувального стенда, до складу якого входить одна стіна, а інші шість - передбачають його кутову конфігурацію, причому один з них – наявність двох стінових конструкцій (ISO 13785 [122]).

Основними відмінностями між додатковими методами випробувань фасадів, що застосовуються в Європі, є:

- масштаб випробувань (середньомасштабні та великомасштабні);
- конструкція опорної стіни (з внутрішнім прямим кутом або пласкою стіною);
- наявність прорізів у конструкції опорної стіни;
- сценарій пожежі (місце розташування модельного вогнища) та її потужність (зовнішня чи внутрішня пожежа) [26].

Слід також зазначити, що деякі країни застосовують однакові випробувальні стенди, але результати випробувань оцінюються за різними критеріями. Так, у Швейцарії та Ліхтенштейні встановлено вимоги щодо порядку визначення можливості використання результатів випробування у разі їх проведення згідно з DIN 4102-20 [114] з метою виконання вимог нормативних документів, чинних у Швейцарії [26, 33]. В Австрії користуються випробувальним стендом згідно з DIN 4102-20 [114], але пожежна навантага і місця вимірювання температури дещо інші. Критерії щодо показників пожежнонебезпечності також відрізняються від тих, які встановлено DIN 4102-20 [114].

Крім того, як DIN 4102-20 [114], так і серія стандартів BS 8414 [85, 113], передбачають конфігурації з боковими стінами, які вважаються більш жорсткими, ніж ті, що мають одну стіну. Однак, шість національних методів випробувань в європейських країнах передбачають конфігурацію лише з однією стіною.

Більшість методів передбачають використання конфігурацій випробувального стенда, де сценарій пожежі відповідає виходу продуктів згоряння через проріз у зовнішній поверхні будинку, яка піднімається вздовж фасадної системи на ділянці над прорізом [26, 33].

Розміри модельних вогнищ пожежі та національні методи випробувань суттєво відрізняються, наприклад, використовуються дерев'яні штабелі з масою від 20 кг до 650 кг. Температури, досягнуті на різних висотах, і тепловий потік, який падає на зразки (а також ділянка, на якій досягається певний рівень теплового потоку), залежать не лише від розмірів модельного вогнища пожежі, а також від особливостей сценарію пожежі, таких як місце розташування модельного вогнища пожежі, умови вентиляції та параметри вимірювальної техніки, що використовуються під час випробування [26, 33].

У табл. 2.5 наведено відомості, які містять дані щодо теплового впливу за різних методів випробування, інформацію про які було наведено в [123].

Таблиця 2.5

Тепловий вплив згідно з серією стандартів BS 8414 та DIN 4102-20 [26]

Тепловий вплив	Серія стандартів BS 8414	DIN 4102-20
Тепловий потік (негорюча стіна)	Середнє значення у діапазоні від 45 до 95 кВт/м ² на висоті 1 м над прорізом упродовж 20 хв без перерви. Типове значення для стаціонарного режиму становить 75 кВт/м ² на висоті 1 м над прорізом	60 кВт/м ² на висоті 0,5 м над прорізом. 35 кВт/м ² на висоті 1,0 м над прорізом. 25 кВт/м ² на висоті 1,5 м над прорізом
Температура (негорюча стіна)	Перевищення над температурою навколишнього середовища у протипожежному відсіку більше ніж на 600 °С. Перевищення над температурою навколишнього середовища на зовнішній поверхні негорючої стіни на висоті 2,5 м над прорізом більше ніж на 500 °С	Максимальна температура на зовнішній поверхні негорючої стіни на висоті 1 м над прорізом складає 780 – 800 °С
Максимальна висота вогню над прорізом для негорючої стіни	Приблизно 2,5 м	Приблизно 2,5 м

Окремі європейські країни встановлюють вимоги щодо оцінювання фрагментів, які падають, а також палаючих уламків/краплин. Очевидно, ці вимоги відображають два сценарії: захист шляхів евакуації та пожежно-рятувальних підрозділів та запобігання виникненню вторинних осередків пожежі від палаючих уламків/краплин.

Зведену інформацію щодо наявності таких вимог подано в табл. 2.6.

Таблиця 2.6

Національні вимоги європейських країн щодо критерію наявності падаючих фрагментів, а також палаючих уламків/ краплин [26]

Країна	Вимога	Метод визначення
Австрія	Маса не більше ніж 5 кг або площа поверхні не більше ніж 0,4 м ²	ÖNORM B 3800-5
Данія, Норвегія, Швеція	З фасаду не повинні падати великі фрагменти	SP Fire 105
Фінляндія	Не повинні падати фрагменти зразків (частини стіни) з площею поверхні більше ніж 0,1 м ²	Engineering guidance 16
Німеччина	Реєструють фрагменти, що падають (палаючі і такі, що не горять), з урахуванням джерела вторинного вогнища пожежі на поверсі	DIN 4102-20
Великобританія, Республіка Ірландія	Реєструють факти утворення тріщин, відшарування або утворення палаючих уламків	Серія стандартів BS 8414
Греція	Реєстрування падіння фрагментів	Випробування щодо реакції на вогонь поодиноким палаючим предметом
Угорщина	Утворення фрагменту, що падає, масою понад 5 кг	MSZ 14800-6
Польща	Падіння палаючих уламків	PN-B-02867
Швейцарія, Ліхтенштейн	Реєстрування факту падіння палаючих уламків, у тому числі їх типу і розмірів, а також місця утворення	DIN 4102-20 ÖNORM B 3800-5

У табл. 2.7 узагальнено геометричні параметри випробувальних стендів, що застосовуються в європейських країнах.

Геометричні параметри випробувальних стендів [26]

Метод випробування	Головна стіна, м	Бокова стіна, м	Вікна	Коментар
1	2	3	4	5
BS 8414	2,6 × 8,0	1,5 × 6,0	—	—
DIN 4102-20	2,5 × 6,0	1,5 × 6,0	—	—
Prüfbestimmung für Aussenwand-bekleidungssysteme	3,0 × 8,3	—	—	Бокові стіни відсутні
Technical regulation A 2.2.1.5	4,25 × 9,8	2,25 × 9,8	—	-
PN-B-02867	1,8 × 2,3	—	—	Бокові стіни відсутні
LEPIR 2	4,85 × 7,05	—	Наявні на 1-у і 2-у поверхах	Бокові стіни відсутні, наявні вікна та відсіки
MSZ 14800-6	4,4 × 7,27	—	Наявні	Бокові стіни відсутні, наявні вікна та відсіки
ÖNORM B 3800-5	3,5 × 6,0	2,0 × 6,0	—	Випробувальний стенд згідно з DIN 4102-20
SP Fire 105	4,0 × 6,0	—	Наявні на 2-у і 3-у поверхах	Бокові стіни відсутні, наявні вікна
Engineering guidance 16	Не менше ніж 4,0 × 8,0	—	Наявні на 2-у і 3-у поверхах	Бокові стіни відсутні, наявні вікна
ISO 13785-2	3,0 × 5,7	1,2 × 5,7	—	Відсутні вікна
ISO 13785-1	1,2 × 2,8	0,6 × 2,8	—	Визначається DIN

Аналізування основних геометричних параметрів випробувальних стендів показує, що ті з них, які передбачено як серією стандартів BS 8414 [85, 113], так і DIN 4102-20 [114], в цілому ідентичні з огляду на розміри і геометричні параметри і жоден з них не передбачає наявності додаткових

прорізів над джерелом вогню, що є частиною конфігурації випробування. Основні відмінності інших випробувальних стендів відносно стендів, визначених у BS 8414 [85, 113] та DIN 4102-20 [114], можна прокоментувати наступним чином. Ширина випробувальних стендів, як правило, більша, єдиним винятком є метод випробування, передбачений польськими нормами PN-B-02867 [112]. Більшість випробувальних стендів мають таку саму або більшу висоту, за винятком PN-B-02867 [112] та MSZ 14800-6 [119]. Існує тільки один метод, який передбачає використання бокової стіни і ця стіна набагато вища. Чотири методи передбачають наявність вікон або додаткових прорізів у складі випробувального стенда. Методи випробування LEPIR 2 [118] та MSZ 14800-6 [119] передбачають наявність приміщень на двох рівнях (поверххах) [26].

Тож, слід підтвердити той факт, що у європейських країнах існують суттєві розбіжності між національними методами випробування та оцінювання фасадних систем, основними з них є:

- тепловий вплив на зразок;
- тривалість випробування (тривалість вогневого впливу і тривалість спостереження);
- поширювання вогню у горизонтальному/вертикальному напрямку;
- фрагменти, що падають/палаючі уламки;
- особливості конструкції, такі як віконні прорізи;
- стик фасаду з перекриттям;
- тління зразка [26].

Окремо слід наголосити на величині теплового впливу на зразок, який залежить від таких чинників як: тип горючих матеріалів; умов тепло-газообміну у камері згоряння, умов в приміщенні споруди для вогневих випробувань; розміщення пожежної навантаги відносно поверхні зразка для випробувань [26, 33].

Інформацію щодо тривалості проведення випробування узагальнено у табл. 2.8.

Таблиця 2.8

Тривалість поведення випробувань згідно із різними національними методами [26]

Метод випробування	Тривалість випробування
1	2
DIN 4102-20	Дерев'яний штабель/газовий пальник потрібно вимикати/гасити через 20 хв, після чого має місце спостереження за зразком не менше ніж 40 хв (не більше ніж 15 год)
Серія BS 8414	60 хв (30 хв вогневого впливу і 30 хв спостереження після гасіння вогнища пожежі)
PN-B-02867	Проміжок часу впливу вогнища пожежі 15 хв (після завершення цього проміжку часу вогнище пожежі потрібно відвести від зразка), після чого має місце спостереження за зразком тривалістю 15 хв (загальна тривалість випробування 30 хв)
Engineering guidance 16	Тривалість випробування складає 30 хв від моменту запалювання всіх горючих матеріалів. Тривалість горіння складає (15 – 20) хв, тривалість охолодження – приблизно 10 хв
ISO 13785-1	30 хв
ISO 13785-2	Повний проміжок часу вогневого впливу 15 хв. Упродовж (4-6) хв забезпечується збільшення інтенсивності вогневого впливу, після чого відбувається його послабленням до повного загасання зразка
LEPIR 2	Перше оцінювання проводять у момент часу 30 хв. Друге оцінювання проводять у момент часу 60 хв
MSZ 14800-6	Максимальна тривалість випробування складає 45 хв
Prüfbestimmung für Aussenwandbekleidungssysteme	40 хв
SP Fire 105	16 – 18 хв
Technical regulation A 2.2.1.5	Через 25 хв штабель гасять, але без завдання шкоди зразку, після чого здійснюється спостереження тривалістю не менше ніж 60 хв
ÖNORM B 3800-5	30 хв. Якщо через 30 хв горіння фасаду триває, то проводять спостереження за зразком до моменту коли горіння зникне

Як видно із табл. 2.8 тривалість вогневого впливу, залежно від методу, знаходиться в межах від 15 хв до 45 хв. В окремих випробуваннях

пожежна навантага може згорати повністю, в інших випадках вогнище гасять після завершення заданого проміжку часу. Крім того, окремі методи передбачають процес спостереження за зразком, що піддався випробуванню, після гасіння вогнища. Ймовірно тривалість вогневого впливу пов'язана із часом доягнення модельним вогнищем пожежі масштабів повністю розвинутої пожежі (II фази) [26, 33].

За результатами досліджень, наведених в [26], для країн ЄС планується розроблення єдиного додаткового методу випробувань фасадних систем, який би враховував національні особливості підходів до таких випробувань країн-членів. Також планується запропонувати схему класифікації фасадів щодо здатності поширювати вогонь, яка б могла враховувати й результати раніше проведених випробувань за національними методами.

2.4 Висновки до розділу

1. Використання конструкцій зовнішніх стін із фасадною теплоізоляцією та штукатурним оздобленням є досить поширеним та популярним не лише в нашій країні. Роботи з утеплення можна виконувати як під час нового будівництва, так і під час реконструкції або капітального ремонту вже існуючих будівель. Для влаштування зовнішніх теплоізоляційно-оздоблювальних систем фасадів використовують дві основні технології: 1 – фасадна теплоізоляційна композиційна система зовнішніх стін із теплоізоляцією та штукатурним оздобленням (штукатурна система теплоізоляції); 2 – навісна система теплоізоляції з повітряним прошарком (вентильовані фасади).

2. В Україні основною характеристикою, яка дозволяє використання конструкцій із горючою фасадною теплоізоляцією та штукатурним оздобленням або дрібноштучними виробами для будівель та споруд висотою понад 9 м, є здатність збірних систем не поширювати вогонь по фасаду. Ця характеристика підтверджується виключно натурними вогневими випробуваннями, зокрема за методикою ДСТУ 9072:2021, яка є найбільш поширеною на практиці серед інших, зазначених у ДСТУ Б В.1.1-21 та ДСТУ Б В.1.1-22.

3. Визначено конструктивні параметри облаштування протипожежних поясів і обрамлення віконних та балконних прорізів, які забезпечують обмеження поширення вогню по фасаду під час пожежі. Периметр будівлі, а також віконні, балконні та вентиляційні прорізи повинні бути облаштовані протипожежними поясами з негорючих плит з мінеральної вати завширшки не менше двох товщин використаної теплоізоляції. Облаштування таких поясів може бути як горизонтальним, так і вертикальним. Периметр евакуаційних виходів з будівлі повинен мати пояси шириною не менше 1 м. Також необхідно облаштовувати зазначеними плитами внутрішні кути будівлі за наявності в них віконних та балконних прорізів.

4. Встановлено, що в країнах ЄС застосовується 12 методів щодо визначення додаткових характеристик фасадних систем, на які не поширюється класифікація за «реакцією на вогонь». Ці методи регламентовані національними стандартами або настановами щодо показників пожежонебезпечності фасадів. Із зазначених методів 4 позиціонуються як з помірним тепловим впливом (середньомасштабні випробування), решта 8 – з потужним тепловим впливом (великомасштабні випробування). Крім того, 2 методи передбачають сценарій пожежі поза межами будинків (тобто імітується пожежа ззовні), решта 10 методів випробування передбачають сценарії пожежі усередині будинку, коли вплив на фасад вогнем відбувається крізь проріз (віконний, дверний тощо). Для реалізації великомасштабних випробувань у 6 методах передбачають використання випробувального стенда, до складу якого входить одна стіна, інші 6 методів - його кутову конфігурацію (внутрішній кут утворений двома стінами).

5. За результатами проведених аналітичних досліджень узагальнено значний обсяг інформації по застосуванню методів випробувань фасадних систем по 31 країні, зокрема щодо конфігурацій випробувальних стендів та їх розмірів, параметрів вогневого впливу, горючих матеріалів, що застосовуються для його створення, розмірів і умов вентиляції камери згоряння, критеріїв характеристик, які фіксуються у процесі випробувань, тривалості випробування, пропонованої схеми класифікації фасадних систем та граничних значень величин за результатами натурних вогневих випробувань.

РОЗДІЛ 3. МЕТОДИКА ТА ОБЛАДНАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ЗБІРНИХ СИСТЕМ ФАСАДНОЇ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЇ НА ПОШИРЕННЯ ВОГНЮ

3.1 Обґрунтування параметрів випробувального обладнання і процедури проведення випробувань збірних систем фасадної теплоізоляції з опорядженням штукатурками на поширення вогню

Під час випробувань систем фасадної теплоізоляції на поширення вогню за [69] зразок для випробування (досліджувану систему фасадної теплоізоляції) наносять на зовнішню поверхню фасадної стіни фрагменту будинку, яка має висоту 5,6 м і ширину 4,2 м. У приміщенні цього будинку висотою 5,6 м, площею підлоги 13,5 м², з віконним прорізом розмірами 1,2 м × 2,4 м, розміщують модельне вогнище з деревини. Результати проведених експериментальних досліджень свідчать про те, що зазначене випробувальне обладнання протягом проміжку часу 30 хв створює в приміщенні стандартний температурний режим за ДСТУ Б В.1.1-4 при застосовуванні в модельному вогнищі пожежі згідно ДСТУ Б В.1.1-18 деревини, яка має відносну вологість не більше ніж 15,0 %. За вологості деревини 17,2 % і 22,4 % температурний режим у приміщенні значно менший за стандартного температурного режиму.

Під час випробування вогонь, який поширюється з приміщення фрагменту будинку крізь віконний проріз, здійснює тепловий вплив на зовнішню поверхню системи фасадної теплоізоляції. Протягом 30 хв випробування проводять вимірювання температури у приміщенні, біля зовнішньої поверхні і всередині (в шарі утеплювача) системи фасадної теплоізоляції.

Тривалість випробування, яка складає 30 хв, можна обґрунтувати, виходячи із максимального значення нормованої межі вогнестійкості для зовнішніх ненесучих стін, яке наведено в ДБН В.1.1-7. У цих будівельних нормах наведено, що для будинків I, III і IIIб ступенів вогнестійкості межа

вогнестійкості зовнішніх ненесучих стін має бути не менше ніж 30 хв, а для будинків інших ступенів вогнестійкості – не менше ніж 15 хв.

Для вимірювання температури у приміщенні і біля зовнішньої поверхні системи фасадної теплоізоляції необхідно використовувати термопари з діаметром дроту не більше 1,5 мм типу ТХА або термопари інших типів, що придатні для вимірювання температури в діапазоні від 0 °С до 1300 °С.

Для вимірювання температури всередині (в утеплювачі) системи фасадної теплоізоляції необхідно використовувати термопари з дроту діаметром від 0,5 мм до 0,75 мм типу ТХК або термопари інших типів, що придатні для вимірювання температури в діапазоні від 0 °С до 600 °С.

В [69] зазначено, що за результатами вимірювання температур проводять порівняння максимальних значень температури в утеплювачі, визначені для контрольних точок, з температурою займання утеплювача, а за відсутності даних щодо цієї температури займання, приймають температуру 400 °С. Вважаємо за доцільне для підвищення достовірності результатів випробувань підкреслити, що порівняння максимальних значень температури в утеплювачі може також порівнюватись з експериментально-визначеною температурою його займання.

Також, з метою підвищення достовірності результатів випробувань, зокрема щодо способу фіксації факту поширення чи непоширення вогню по зовнішній поверхні системи фасадної теплоізоляції, доцільним є уточнити та доповнити критерії їх віднесення до таких, що не поширюють полум'я поверхнею.

Нижче у табл. 3.1 наведено порівняння критеріїв віднесення систем до таких, що не поширюють вогонь поверхнею згідно із [69] та критерії, які доцільно передбачити для таких систем, враховуючи при цьому пропоновані критерії для системи класифікації фасадних систем в країнах ЄС, а також досвід випробувань збірних систем фасадної теплоізоляції в Україні.

Таблиця 3.1

Критерії для систем фасадної теплоізоляції, що не поширюють вогонь [26]

Критерії згідно із [69]	Запропоновані критерії
1	2
ТОС не поширює вогонь, якщо не відбулося поширення полум'я по зовнішній поверхні ТОС та для всіх термопар, що розташовані усередині ТОС температура не перевищувала 400 °С	Збірна система фасадної теплоізоляції не поширює вогонь, якщо не відбулося вертикального та горизонтального поширення вогню по її зовнішній поверхні та в середині
Поширення полум'я зовнішньою поверхнею визначається за даними фото- відеозйомки шляхом фіксації поширення полум'я по зовнішній поверхні ТОС за межі безпосереднього контакту вогнища з ТОС	Поширення вогню зовнішньою поверхнею системи у вертикальному напрямку визначається: 1) за даними фото- відеозйомки шляхом фіксації вертикального поширення вогню по зовнішній поверхні системи за межі безпосереднього контакту вогнища з системою, а також вимірюванням температури біля поверхні системи на висоті 3,5 м над вогневою камерою (термопари Т30-Т32), значення температури на яких не повинні перевищувати 500 °С у будь-який момент часу випробування; 2) на зовнішній поверхні системи на висоті 3,5 м над вогневою камерою не повинно бути безперервного полуменевого горіння упродовж більше ніж 30 с та/або пошкоджень системи; 3) у верхній частині зразка (верхній торець системи) у будь-який момент часу випробування не повинно бути вогню
	Поширення вогню зовнішньою поверхнею системи у горизонтальному напрямку визначається: 1) за даними фото- відеозйомки шляхом фіксації горизонтального поширення вогню по зовнішній

	поверхні системи за межі безпосереднього контакту вогнища з системою, а також вимірюванням температури біля поверхні системи в крайніх лівих точках на стіні А (термопари Т13, Т14, Т18, Т22, Т26), значення температури на яких не повинні перевищувати 500 °С у будь-який момент часу випробування; 2) на правому та лівому краях системи на стіні А не повинно бути вогню у будь-який момент часу випробування
Поширення полум'я усередині ТОС визначається за значеннями температури на термopарax (Т33-Т44), розміщених усередині ТОС	Поширення вогню усередині системи у вертикальному напрямку визначається: 1) вимірюванням температури усередині системи над віконним прорізом (термопари Т33-Т44), значення температури на яких не повинні перевищувати 400 °С у будь-який момент часу випробування
	Поширення вогню усередині системи у горизонтальному напрямку визначається: 1) вимірюванням температури усередині системи з лівого краю на стіні Б (термопари Т45-Т48), значення температури на яких не повинні перевищувати 400 ° С у будь-який момент часу випробування

3.2 Експериментальні дослідження температурного режиму у вогневій камері фрагменту будинку при різних умовах навколишнього середовища

3.2.1 Конструкція фрагмента будинку та модельного вогнища

Фрагмент будинку являє собою двоповерхову споруду (рис. 3.1) загальною висотою 5,6 м. Приміщення першого поверху є вогневою камерою і призначене для створення у ньому температурного режиму,

наближеного до стандартного температурного режиму за ДСТУ Б В.1.1-4 [70].

Відстань між підлогами першого та другого поверху складає 2,8 м. Підлогою першого поверху є залізобетонна плита завтовшки 0,3 м. Переkritтям першого поверху та покриттям фрагмента будинку є залізобетонні плити завтовшки 0,2 м. Приміщення першого поверху має віконний проріз розміром 1,2 м × 2,4 м. Стіни фрагмента будинку виконують з бетонних блоків завтовшки 0,19 м. Стіни А та Б фрагмента будинку призначені для монтажу збірної системи фасадної теплоізоляції, що безпосередньо підлягає випробуванню на поширення вогню.

Колону перерізом 39 см × 39 см виконують із застосуванням бетонних блоків. Внутрішні розміри приміщень на першому та другому поверсі складають 3,3 м × 4,3 м × 2,6 м. Приміщення мають дверні прорізи. Дверний проріз першого поверху до початку випробування закладають притвором, що виготовлений з гіпсокартонних плит (згідно з ДСТУ EN 520) завтовшки 12,5 мм, у чотири шари. Дверний проріз другого поверху під час випробування має бути відкритим.

Внутрішню поверхню стін, стелю вогневої камери, колону та відкоси віконного прорізу, в межах вогневої камери облицьовують гіпсокартонними плитами завтовшки 12,5 мм у чотири шари.

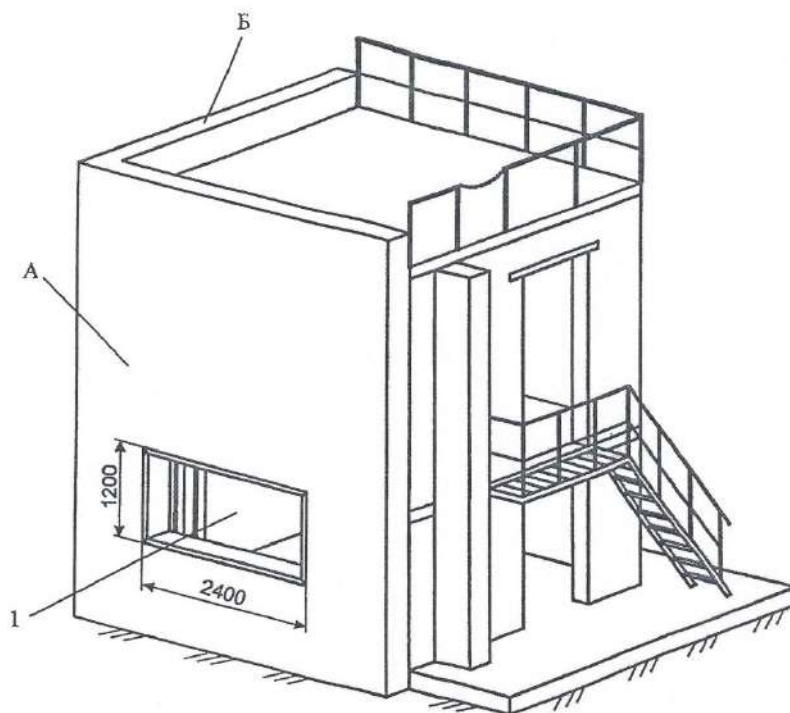


Рисунок 3.1 – Фрагмент будинку для випробування збірних систем фасадної теплоізоляції з опорядженням штукатурками та дрібноштучними елементами на поширення вогню: А, Б – стіни, які призначені для монтажу збірної системи фасадної теплоізоляції, що підлягає випробуванню; 1 – віконний проріз [124]

Підлогу вогневої камери захищають гіпсокартонними плитами завтовшки 12,5 мм у два шари. Площа цієї підлоги (з урахуванням облицювання стін гіпсокартонними плитами) становить 13,5 м². Після кожного випробування внутрішнє облицювання конструкцій першого поверху повинно поновлюватися.

Внутрішні поверхні стін та стелю приміщення на другому поверсі фрагмента будинку захищають одним шаром гіпсокартонних плит завтовшки 12,5 мм, а підлогу цього приміщення – двома шарами гіпсокартонних плит завтовшки 12,5 мм. Колони та елементи кріплення у цьому приміщенні не захищають.

Фрагмент будинку оснащено драбинами для забезпечення доступу до другого поверху та на покриття.

Для проведення випробування застосовують модельне вогнище пожежі, конструкцію і вимоги до якого наведено в ДСТУ Б В.1.1-18. Для цього у приміщенні першого поверху будинку встановлювали конструкцію у вигляді штабеля брусків з деревини, який складався з 18-ти повних ярусів та одного неповного (рис. 3.2). Кожний поперечний ярус складався з 14 елементів довжиною 1,22 м, а кожний повздовжній ярус – з 7 елементів довжиною 2,44 м. Верхній ярус складався з 3 елементів довжиною 2,44 м. Вся конструкція має 18 повних ярусів та 1 неповний. Штабель встановлювали на бетонних блоках на висоті 200 мм над рівнем підлоги.

Для підпалювання під штабелем розташовували два сталевих дека розмірами (1800 × 160 × 60) мм з товщиною стінок 3 мм. У кожне «деко» наливали по 3 л нафтового стандартизованого дизельного палива.

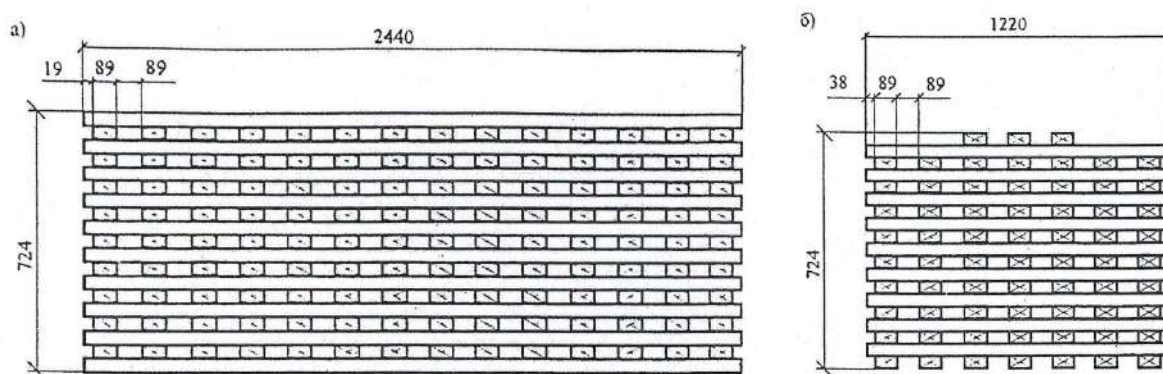


Рисунок 3.2 – Схема складання штабеля брусків з деревини хвойних порід створення температурного режиму у вогневій камері [124]

Бруски закріплювали цвяхами у вигляді решітчастої кладки, яка вміщує повні яруси та один неповний ярус, який складається з брусків довжиною 2,44 м. Зовнішні розміри штабелю повинні складати: 1,22 м завширшки, 2,44 м завдовжки та 0,724 м заввишки. Штабель повинен розташовуватись симетрично відносно центру прорізу вікна та бути зміщеним у бік вікна. Схему розташування штабелю брусків з деревини у вогневій камері наведено на рис. 3.3. Питоме вогневе навантаження (у перерахунку на деревину) має бути не менше ніж 25 кг/м², що відповідає

умовам створення у вогневій камері на протязі 30 хв. температурного режиму, найбільш наближеного до стандартного температурного режиму (3.1).

$$T_s = 345 \lg(8t + 1) + 20 \quad (3.1)$$

де T_s - температура у вогневій камері, яка відповідає часу t , °C;

t - час що відраховується від початку випробування, хв.

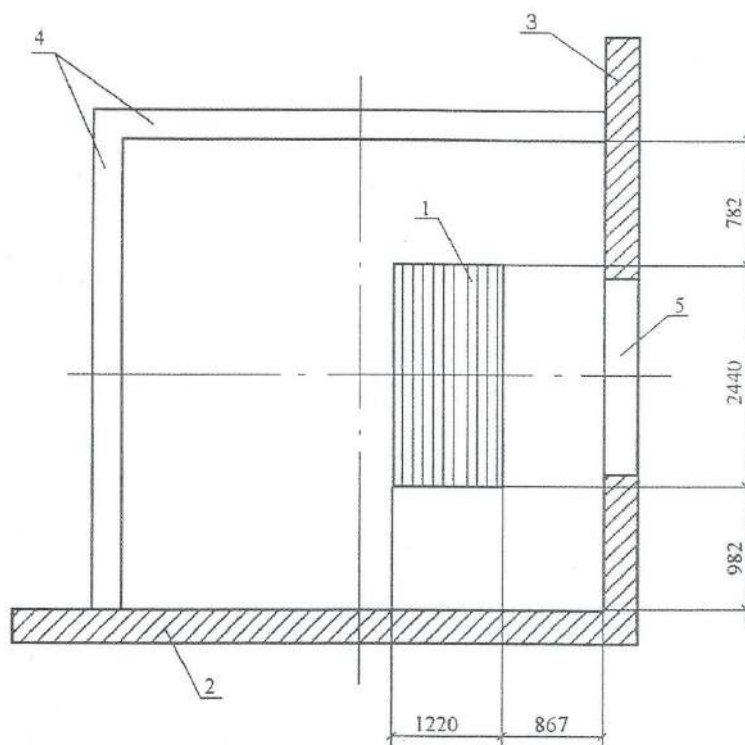


Рисунок 3.3 – Схема розташування штабеля брусків з деревини у вогневій камері: 1 – штабель брусків з деревини; 2, 3 – стіни, які призначені для монтажу збірної системи фасадної теплоізоляції; 4 – стіни з бетонних блоків; 5 – віконний проріз [124]

3.2.2 Засоби вимірювальної техніки

Для випробування використовують такі засоби вимірювальної техніки:

– засоби для вимірювання температури у фрагменті будинку (температури у вогневій камері, температури середовища біля віконного прорізу і біля зовнішньої поверхні стін збірної системи фасадної

теплоізоляції, а також температури усередині збірної системи фасадної теплоізоляції);

- пристрої для вимірювання параметрів навколишнього середовища (температури повітря, вологості повітря, швидкості та напрямку вітру, атмосферного тиску);

- прилади для вимірювання розмірів, маси, вологості дерев'яних брусків для створення модельного вогнища пожежі;

- прилади для вимірювання розмірів шарів збірної системи фасадної теплоізоляції;

- прилад для вимірювання тривалості випробування.

Засоби вимірювальної техніки мають забезпечувати вимірювання параметрів з похибкою, значення якої не перевищує:

а) при вимірюванні температури:

- у вогневій камері, біля віконного прорізу та зовнішньої поверхні стін збірної системи фасадної теплоізоляції $\pm 15\text{ }^{\circ}\text{C}$;

- усередині збірної системи фасадної теплоізоляції $\pm 6\text{ }^{\circ}\text{C}$;

- навколишнього середовища $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$;

б) при вимірюванні розмірів:

- шарів збірної системи фасадної теплоізоляції $\pm 1\text{ мм}$;

- перерізу брусків з деревини $\pm 1\text{ мм}$;

- довжини брусків з деревини $\pm 5\text{ мм}$;

в) при вимірюванні маси брусків з деревини $\pm 30\text{ г}$;

г) при вимірюванні вологості:

- деревини для штабеля брусків $\pm 2\text{ }\%$;

- повітря $\pm 5\text{ }\%$;

д) при вимірюванні швидкості вітру $\pm 0,2\text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$;

е) при вимірюванні атмосферного тиску $\pm 4\text{ мм рт. ст.}$;

ж) при вимірюванні тривалості випробування $\pm 5\text{ с}$.

Для вимірювання температури у фрагменті будинку слід використовувати термоелектричні перетворювачі (термопари) та прилад

реєстрації та запису температури, які забезпечують вимірювання температури та реєстрацію з інтервалом не більше ніж 10 с.

3.2.3 Вимірювання температури у вогневій камері

Для вимірювання температури у вогневій камері необхідно використовувати термопари з діаметром дроту не більше 1,5 мм типу ТХА або термопари інших типів (за ДСТУ EN 60584-1 [125]), що придатні для вимірювання температури в діапазоні від 0 °С до 1300 °С.

Можуть застосовуватися термопари з неізольованими проводами або термопари, що покриті захисним кожухом.

Захисний кожух термопари має бути видалений (відрізаний і знятий) на довжині не менше 25 мм від вимірювального спаю термопари. Вимірювальний спай термопари має бути звареним.

Температуру у вогневій камері необхідно вимірювати за допомогою термопар у дев'яти різних точках. З цих дев'яти точок, щонайменше п'ять термопар мають бути розташовані на одній горизонтальній площині, на відстані (200 ± 5) мм від поверхні стелі. Додатково, мають бути встановлені по дві термопари на інших горизонтальних площинах, на відстані (850 ± 5) мм та (1500 ± 10) мм від поверхні стелі відповідно. Вимірювальний спай термопар повинен бути розташований на відстані від 190 мм до 210 мм від поверхні стін.

Рекомендовану схему розташування термопар у вогневій камері зображено на рис. 3.4.

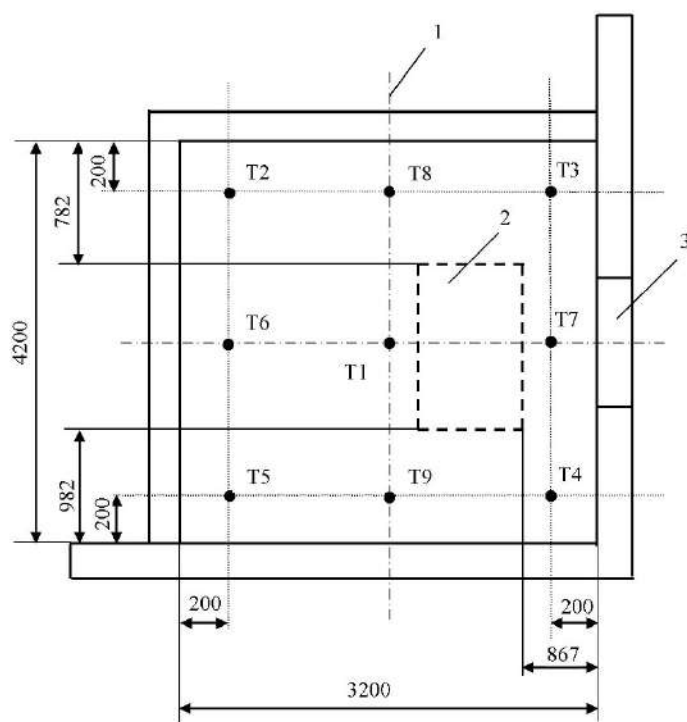


Рисунок 3.4 – Схема розташування термопар у вогневій камері:

1 – вісь симетрії вогневої камери; 2 – штабель брусків з деревини;
3 – віконний проріз; T1–T5 – на відстані 200 мм від поверхні стелі;
T6, T7 – на відстані 850 мм від поверхні стелі; T8, T9 – на відстані
1500 мм від поверхні стелі [124]

3.2.4 Вимірювання температури середовища біля віконного прорізу

Для вимірювання температури в середовищі біля віконного прорізу вогневої камери, використовують термопари.

Температуру в середовищі (полум'я) біля віконного прорізу вогневої камери вимірюють у не менше ніж трьох точках. Вимірювальний спай термопар має бути розташований на відстані від 140 мм до 160 мм від верху віконного прорізу і на відстані від 20 мм до 30 мм від площини стіни А (рис. 3.5).

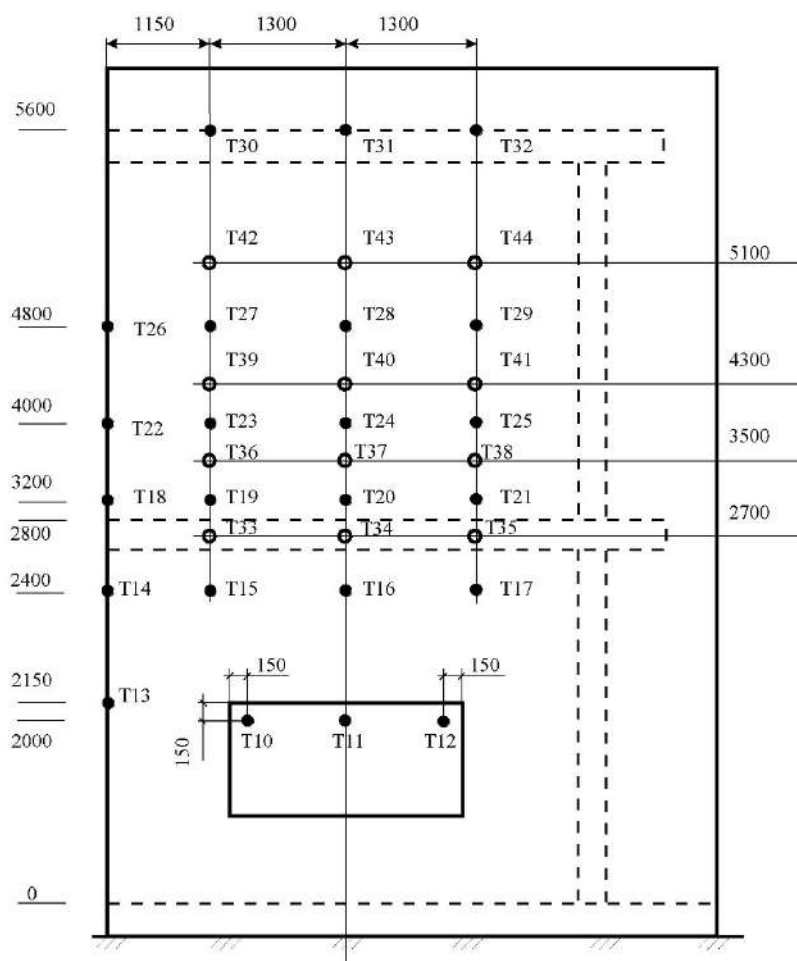


Рисунок 3.5 – Схема розташування термопар на стіні А:

T10–T12 – термопари для вимірювання температури середовища біля віконного прорізу; T13–T32 – термопари для вимірювання температури середовища біля зовнішньої поверхні збірної системи фасадної теплоізоляції; T33–T44 – термопари для вимірювання температури усередині збірної системи фасадної теплоізоляції [124]

3.2.5 Вимірювання температури усередині збірної системи фасадної теплоізоляції

Для вимірювання температури усередині збірної системи фасадної теплоізоляції необхідно використовувати термопари з діаметром дроту не більше 0,75 мм типу ТХА або термопари інших типів (за ДСТУ EN 60584-1 [125]), що придатні для вимірювання температури в діапазоні від 0°C до 600°C.

Температуру усередині збірної системи фасадної теплоізоляції слід вимірювати на стінах А і Б термopарами не менше, ніж в дванадцяти і чотирьох точках, відповідно. Вимірювальний спай термopар має бути встановлено в шарі теплоізоляції на відстані не більше ніж 25 мм від зовнішньої поверхні шару теплоізоляції (з боку, що протилежний вогневій камері). Схему розташування термopар усередині збірної системи фасадної теплоізоляції наведено на рис. 3.6.

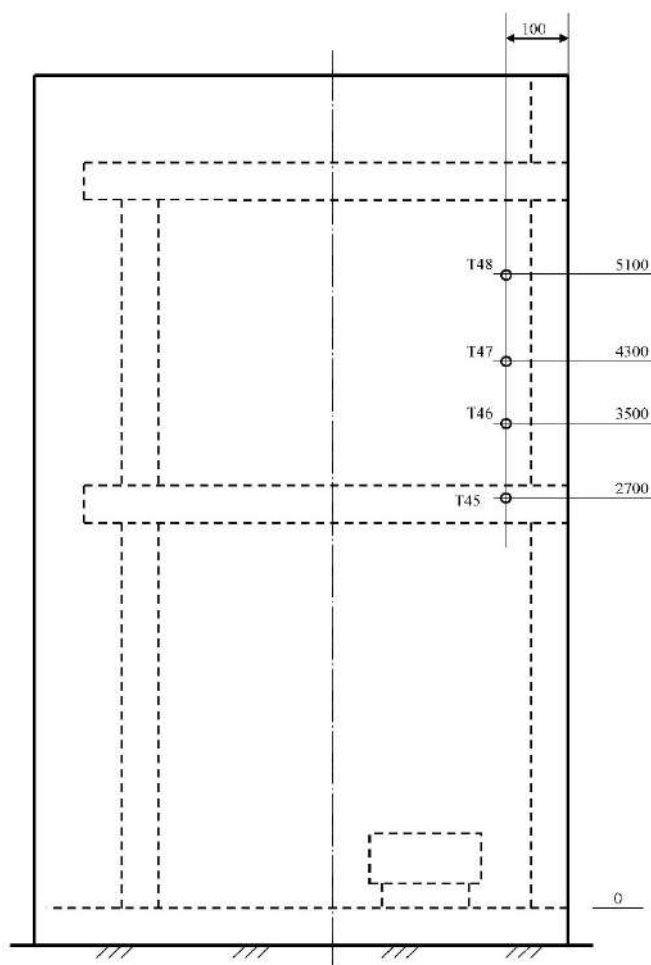


Рисунок 3.6 – Схема розташування термopар, на стіні Б:

Тв45 - Тв48 – термopари для вимірювання температури усередині збірної системи фасадної теплоізоляції [124]

3.3 Підготовка та проведення випробування

До початку випробування виконують такі процедури:

- перевіряють відповідність зразка збірної системи фасадної теплоізоляції технічній документації;
- проводять вогнезахисне облицювання будівельних конструкцій фрагмента будинку гіпсокартонними плитами;
- проводять монтаж термопар у фрагменті будинку;
- виготовляють модельне вогнище пожежі і розташовують його у вогневій камері;
- перевіряють відповідність вологості брусків з деревини в модельному вогнищі пожежі вимозі ДСТУ Б В.1.1-18 [126], згідно з якою ця вологість має бути не більше 15 %;
- проводять підготовку до роботи засобів вимірювальної техніки та обладнання для проведення фото- та відеозйомок відповідно до інструкцій з експлуатації на них;
- проводять з'єднання термопар з засобами для вимірювання температури і перевіряють їх працездатність;
- не більше ніж за 5 хв до початку випробування вимірюють і реєструють початкові значення температур за показниками усіх термопар, а також значення усіх вимірювальних та контрольованих величин: температури і вологості повітря, швидкості вітру біля фрагменту будинку та атмосферного тиску;
- проводять підготовку дека і штабеля брусків з деревини до підпалювання. Не більше ніж за 3 хв до початку випробування заповнюють дека паливом та закривають дверний проріз першого поверху притвором.

Початком випробування вважають момент підпалювання дека.

Підпалюють дека за допомогою пристрою дистанційного підпалювання і одночасно починають відлік тривалості випробування та реєстрації температури.

Під час проведення випробування проводять вимірювання та

реєстрування температури у фрагменті будинку з інтервалом не більше 10 с. Спостерігають за наявністю полуменевого горіння на зовнішній поверхні зразка збірної системи фасадної теплоізоляції та на її верхньому, лівому та правому краях. Також спостерігають за поведінкою зразка і складають хронологічний опис змін у зразку, тобто: деформацій, порушень цілісності, появи полум'я, тріщин, диму, розм'якшення, розплавлення та обвуглювання матеріалів тощо. Спостереження проводять візуально і шляхом фото- та відеозйомки [124].

По досягненню тривалості випробування 30 хв слід загасити модельне вогнище пожежі через віконний та дверний прорізи вогневої камери із застосуванням засобів водяного пожежогасіння при дотриманні вимог безпеки. За наявності горіння зразка збірної системи фасадної теплоізоляції (на поверхні або всередині), ознаками якого є полум'я та (або) виділення диму, гасити його забороняється. Вимірювання і реєстрацію температур слід виконувати протягом тривалості випробування не менше ніж 40 хв. Реєстрацію температур припиняють за умови зниження значень температури, визначених за показами всіх термopарaх.

Після випробування визначають розміри пошкоджень, що виникли у зразку внаслідок вогневого впливу. Пошкодженнями вважають обвуглення і вигорання матеріалів збірної системи фасадної теплоізоляції, а також їхнє оплавлення. Фіксують профілі пошкодження збірної системи фасадної теплоізоляції (її зовнішнього та внутрішнього шарів). Для визначення розмірів пошкоджень внутрішнього шару (шару теплоізоляції) необхідно розкрити зовнішній шар (оздоблювальний та армувальний). Проводять фотозйомку зразка до і після розкривання зовнішнього шару збірної системи фасадної теплоізоляції [124].

3.4 Оброблення експериментальних даних температурних вимірювань

За показами термопар T1–T9 визначають середні значення температури T_k у камері згорання для кожного моменту часу t_j реєстрації температур.

За показами термопар T10–T12 визначають середні значення температури полум'я T_v у віконному прорізу для кожного моменту часу t_j реєстрації температур.

Результати вимірювання температур у фрагменту будинку і визначення температур T_k , T_v наводять в табличній і графічній формах. На графіку залежностей $T_k(t)$, $T_v(t)$ надають також залежність $T_s(t)$ для стандартного температурного режиму, встановлену в ДСТУ Б В.1.1-4.

За даними термопар T13-T48 визначити значення підвищення температури ΔT_i в кожній i -ій точці ($i = 13, 11, \dots, 48$) виміру для кожного моменту часу t_j за формулою:

$$\Delta T_i = T_i - T_{i0} \quad (3.2)$$

де T_i - температура в i -ій точці в момент часу t_j , °C;

T_{i0} початкове значення температури в i -ій точці (визначено не більше, ніж за 5 хв. до початку випробування), °C.

Результати вимірювання температур у фрагменту будинку і визначення температур T_k , T_v , ΔT_i навести в табличній формі. У графічній формі надати залежності $T_k(t)$, $T_v(t)$.

На цьому ж графіку навести залежність $T_s(t)$.

За даними таблиці визначити номери термопар (з T13-T48), для яких в будь-який момент часу випробування виконується така умова:

$$\Delta T_i > 400 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (3.3)$$

Оцінювання проводять на основі отриманих результатів вимірювання температури середовища біля зовнішньої поверхні збірної системи фасадної теплоізоляції, результатів вимірювання температури усередині цієї системи, візуальних спостережень, фото- та відеозйомки.

Збірну систему фасадної теплоізоляції вважають такою, що не поширює вогонь, якщо виконуються всі такі умови:

- значення температури, визначені за показами термопар T13, T14, T18, T22, T26, T30–T32, не перевищують 500 °C у будь-який момент часу випробування (як під час тривалості вогневого впливу, так і після гасіння модельного вогнища);
- значення температури, визначені за показами термопар T33–T48, не перевищують 400 °C у будь-який момент часу випробування;
- на зовнішній поверхні збірної системи фасадної теплоізоляції на висоті, яка відповідає рівню розташування термопар T30–T32, відсутнє безперервне полум'яне горіння упродовж більше ніж 30 с;
- на висоті, яка відповідає рівню розташування термопар T30–T32, і вище відсутнє пошкодження зовнішнього шару збірної системи фасадної теплоізоляції внаслідок вогневого впливу;
- на верхньому, лівому та правому краях зразка збірної системи фасадної теплоізоляції у будь-який момент часу випробування відсутнє видиме полум'я [124].

Можливість застосування збірної системи фасадної теплоізоляції для оздоблення будинків різних за призначенням, висотою (поверховістю) та ступенем їх вогнестійкості визначається залежно від результатів випробувань одержаних за цією методикою, та показників горючості матеріалів теплоізоляційного та опоряджувального шарів цієї ТОС, які визначаються згідно пожежно-технічної класифікації ДБН В.1.1-7.

Результати випробування застосовні для збірної системи фасадної теплоізоляції, конструкція якої відповідає зразку, який було випробувано. Результати випробування не поширюються на збірні системи фасадної теплоізоляції, які мають конструктивні відмінності від збірної системи фасадної теплоізоляції, зразок якої було випробувано, крім тих допустимих змін, що наведено нижче.

Результати випробування поширюються на збірні системи фасадної

теплоізоляції, в яких товщина шару утеплювача з теплоізоляційного матеріалу не більша за товщину шару утеплювача, який використовували у зразку для випробування.

Результати випробування поширюються на збірні системи фасадної теплоізоляції, в яких застосовують теплоізоляційний матеріал, що має величини густини за ДСТУ Б В.2.6-189 [127] питомої теплоти згоряння за ДСТУ 1716 [67] не більші, а температуру займання за ДСТУ 8829 [56] не нижче ніж у теплоізоляційного матеріалу, який використовували у зразку для випробування.

Результати випробування збірної системи фасадної теплоізоляції, в конструкції зразка якої використано протипожежний пояс та (або) обрамлення віконного прорізу на фасаді фрагмента будинку, виконані з негорючого теплоізоляційного матеріалу за ДСТУ 8829, поширюються на збірні системи фасадної теплоізоляції, в яких застосовують протипожежні пояси, що розташовані між собою на відстані не більше ніж 3,5 м, та (або) обрамлення віконних прорізів на фасаді фрагмента будинку, виконані з негорючого теплоізоляційного матеріалу за ДСТУ 8829, довжина, ширина і глибина яких не менші ніж у протипожежного поясу та (або) обрамлення віконного прорізу, які використовували у зразку для випробування.

Результати випробування, отримані із використанням зразка збірної системи фасадної теплоізоляції без протипожежного поясу та (або) обрамлення віконного прорізу, поширюються на збірні системи фасадної теплоізоляції з протипожежним поясом та (або) обрамленням віконного прорізу, виконані з негорючого теплоізоляційного матеріалу за ДСТУ 8829 [56].

Оброблення експериментальних даних температурних вимірювань у приміщенні для кожного експерименту полягало в наступному. Для кожного моменту часу вимірювання визначали середню температуру T_f в приміщенні, як середнє арифметичне показань термодатчиків Т1–Т9, а також

інтегральне значення A_f цієї температури для проміжку часу 30 хв за такою формулою:

$$A_f = \sum_{i=1}^n 0,5(T_{fi} + T_{fi-1})(t_i - t_{i-1}), \quad (3.4)$$

де T_{fi} – значення середньої температури в приміщенні, що відповідає часу t_i , °C;

t_i – час i -го циклу вимірювання середньої температури, хв;

i – номер циклу вимірювання середньої температури;

n – номер циклу вимірювання, для якого $t_i = 30$ хв.

На рис. 3.7 наведено залежності температур T_s , $T_{\min}$, $T_{\max}$ від часу вогневого впливу для проміжку часу 30 хв.

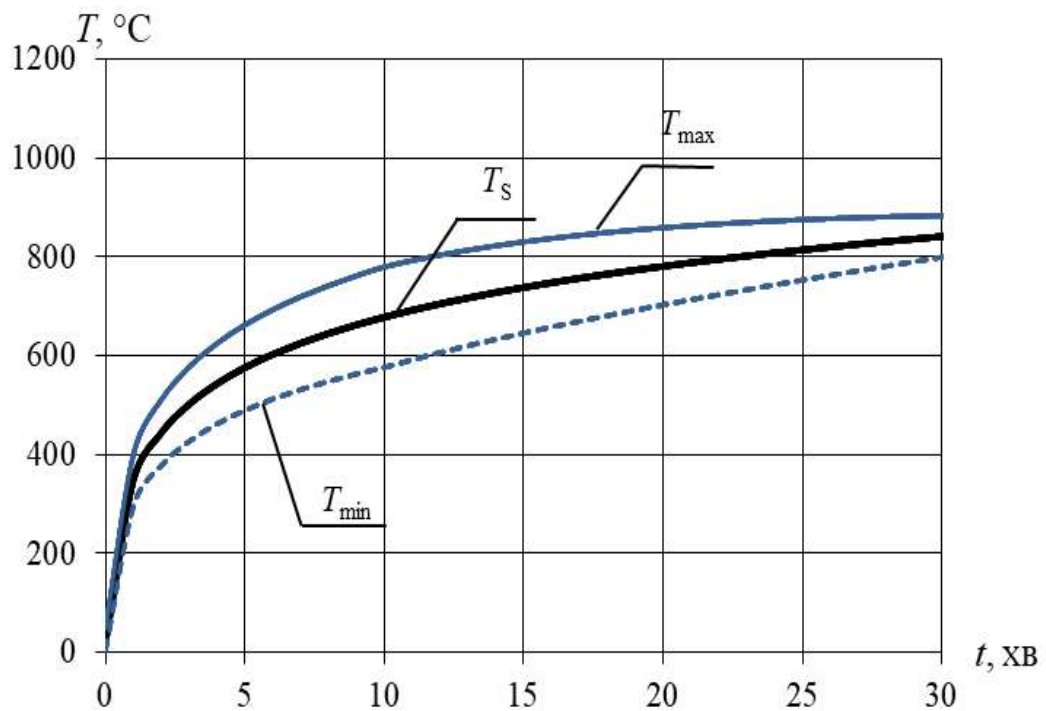


Рисунок 3.7 – Залежності T_s , $T_{\min}$, $T_{\max}$ від часу вогневого впливу

3.4 Висновки за розділом

В ході обґрунтування процедури і умов проведення випробувань збірних систем фасадної теплоізоляції з опорядженням штукатурками та дрібноштучними елементами на поширення вогню:

1. Визначено граничні значення вологості деревини у модельному вогнищі пожежі, температури і вологості повітря зовні фрагменту будинку, за яких під час випробувань систем фасадної теплоізоляції на поширення вогню температурний режим у вогневій камері фрагменту будинку з пожежним навантаженням відповідає стандартному температурному режиму. Показано, що для створення цього режиму у приміщенні необхідно застосовувати деревину, яка має відносну вологість не більше ніж 15,0 %, і такі умови проведення випробувань: температура повітря має бути не менше ніж 5 °С, відносна вологість повітря має бути не більше ніж 85 %.

2. Обґрунтовано параметри випробувального обладнання і процедуру проведення випробувань збірних систем фасадної теплоізоляції з опорядженням штукатурками на поширення вогню.

3. Обґрунтовано тривалість випробування, яка становить 30 хв, виходячи із максимального значення нормованої межі вогнестійкості для зовнішніх не несучих стін згідно вітчизняних будівельних норм.

4. Показана необхідність поділу систем фасадної теплоізоляції на такі два класи: “збірна система фасадної теплоізоляції, що не поширює вогонь” та “збірна система фасадної теплоізоляції, що поширює вогонь”, при цьому, з метою підвищення достовірності результатів випробувань, запропоновано деталізовані критерії оцінювання; встановлено правила щодо визначення розширеної сфери застосування результатів випробувань збірної системи фасадної теплоізоляції.

РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ НАТУРНИХ ВОГНЕВИХ ВИПРОБУВАНЬ КОНСТРУКЦІЙ ЗОВНІШНІХ СТІН ЖИТЛОВИХ БУДИНКІВ ІЗ ФАСАДНОЮ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЄЮ ТА ГОРЮЧИМ УТЕПЛЮВАЧЕМ НА ПОШИРЕННЯ ВОГНЮ

4.1. Підготовка до випробувань на поширення вогню збірної системи фасадної теплоізоляції з горючим утеплювачем середньої товщини 150 мм

Випробуванням піддавали конструкцію зовнішніх стін житлових будинків із фасадною теплоізоляцією та горючим утеплювачем з пінополістирольних плит. Опис та схему розташування шарів системи фасадної теплоізоляції з опорядженням штукатуркою наведено на рис. 4.1.

Для вирівнювання поверхні стіни 1, яка підлягала утепленню, нанесли ґрунтовку кварцеву адгезійну 2 і вирівняли стіну штукатуркою цементно-вапняною фасадною 3 та заґрунтували ґрунтовкою універсальною 4.

На пінополістирольну плиту марки «ПСБ-С-25» 6 середньою товщиною 150 мм, яку закріплено за допомогою клейової суміші для пінополістирольних та мінераловатних плит 5 товщиною (8-10) мм і фасадних дюбелів 8, нанесено армувально-захисний шар.

Армувально-захисний шар складається із двох шарів армуючої клейової суміші для пінополістирольних та мінераловатних плит 10, сітки конструкційної (на основі скловолокна) 11, кутика перфорованого ПВХ із склосіткою 150×100×2500 12 та кутика-капельника ПВХ з склосіткою 100×100×2500 13.

На мінераловатну плиту, що використовувалась для влаштування протипожежного поясу і обрамлення віконного прорізу 7 середньою товщиною 150 мм та середньою шириною 300 мм, яку закріплено за допомогою клейової суміші для пінополістирольних та мінераловатних плит товщиною (8 - 10) мм і фасадних дюбелів LFM 10×260 9, нанесено два шари армуючої клейової суміші для пінополістирольних та

мінераловатних плит 10 між якими встановлено сітку конструкційну (на основі скловолокна) SSA-1363-160 11.

На армувально-захисний шар, який покрито ґрунтуючою фарбою «ГС-18» 15, нанесено оздоблювальний шар із штукатурки декоративної мінеральної «Баранець» 16 середньою товщиною 1,6 мм з фінішним шаром силікон-модифікованої фарби фасадної 17.

Середня товщина оздоблювально-захисного шару, який складається з оздоблювального і захисного шару, становить 10,0 мм.

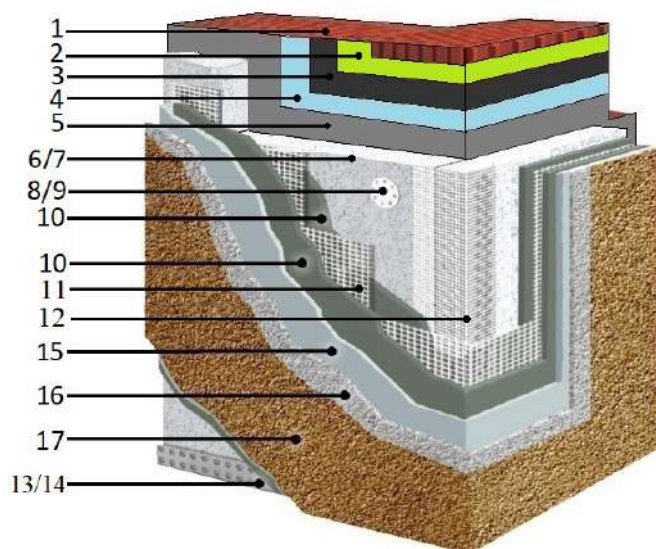


Рисунок – 4.1 Схема конструкції зовнішніх стін з фасадною теплоізоляцією з опорядженням штукатуркою та утеплювачем з пінополістирольних плит середньої товщини 150 мм:

- 1 - поверхня стіни, яка підлягала утепленню; 2 - ґрунтовка кварцева;
- 3 - штукатурка цементно-вапняна фасадна; 4 - ґрунтовка універсальна;
- 5 - клейова суміш для пінополістирольних та мінераловатних плит;
- 6 - пінополістирольна плита марки «ПСБ-С-25», середня товщина 150 мм; 7 - мінераловатна плита, середньою товщиною 150 мм;
- 8, 9 - дюбеля для кріплення пінополістиролу та мінеральної вати;
- 10 - армуюча клейова суміш; 11 - сітка конструкційна;
- 12, 13 - кутики ПВХ; 14 - алюмінієва цокольна рейка; 15 - ґрунтуюча фарба; 16 - штукатурка декоративна мінеральна;
- 17 - силікон-модифікована фарба фасадна.

Випробування проводили згідно з Методом натурних вогневих випробувань збірних систем фасадної теплоізоляції з опорядженням штукатурками та дрібноштучними елементами на поширення вогню. (далі – Метод) [124].

Сутність методу випробувань полягала у визначенні розмірів пошкодження і значення підвищення температури у конструкції збірної системи фасадної теплоізоляції, що нанесена на фрагмент двоповерхового будинку (рис. 4.2), на першому поверсі якого (у вогневій камері) створювали протягом 30 хвилин температурний режим, наближений до стандартного за [124].

Під час випробування визначали температуру середовища біля зовнішньої поверхні збірної системи фасадної теплоізоляції і усередині цієї системи, наявність полуменевого горіння на зовнішній поверхні та на краях системи, а також пошкоджень системи внаслідок вогневого впливу. Отримані експериментальні дані порівнюють з допустимими значеннями, на основі чого роблять висновок щодо віднесення збірної системи фасадної теплоізоляції до такої, що не поширює вогонь або такої, що поширює вогонь.

Фасадна теплоізоляція була нанесена на стіну А, а також на частину стіни Б (на відстані 1,0 м від краю стіни А) фрагмента двоповерхового будинку.

Середня вологість деревини штабелю перед випробуваннями становила 12,4 %.

Для підпалювання штабелю застосовували два дека довжиною 1800 мм та шириною 160 мм, в які заливали по 3 л дизельного пального.

Для вимірювання температури у вогневій камері, всередині та біля поверхні збірної системи фасадної теплоізоляції застосовували термопари типу ТХА.

Вимірювальні спаї термопар Т13 - Т32 встановлювали на відстані (25 - 30) мм від оздоблювального шару конструкції фасадної теплоізоляції,

а термопар Т33 - Т48 - у шарі пінополістирольних плит на відстані не більшій ніж 25 мм від поверхні стикання захисного шару з пінополістирольними плитами.

Реєстрацію вимірних значень температури здійснювали із застосуванням вимірювально-обчислювального комплексу.

Під час проведення випробувань проводили відеозйомку та фотографування фрагмента з двох напрямків.

Після 30 хв. горіння штабелю здійснювали його гасіння водою.

Оцінювання проводили на основі отриманих результатів вимірювання температури середовища біля зовнішньої поверхні збірної системи фасадної теплоізоляції, результатів вимірювання температури усередині цієї системи, візуальних спостережень, фото- та відеозйомки.



Рисунок 4.2 – Вид фрагмента будинку до початку випробувань



Рисунок 4.3 – Вид штабеля брусків з деревини крізь віконний проріз у вогневій камері

Умови проведення випробувань: температура повітря 9,6 °С; відносна вологість повітря 83,5 %; атмосферний тиск 760 мм рт. ст.; середня швидкість вітру протягом 30 хв випробувань 1,5 м/с.

Результати вимірювань швидкості та визначення напрямку вітру на відстані 20 м від фрагмента будинку для випробувань на рівні 1,0 м від поверхні землі наведено у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1

Результати вимірювань швидкості та напрямку вітру

Момент часу, хв	Напрямок вітру	Середня швидкість вітру, м/с	Момент часу, хв	Напрямок вітру	Середня швидкість вітру, м/с
1	південно-західний	1,0	16	південно-західний	1,0
2	західний	1,2	17	західний	1,6
3	західний	1,6	18	північно-західний	1,1
4	північно-західний	0,8	19	північний	1,2
5	північно-західний	0,6	20	північний	1,8
6	західний	1,2	21	північно-західний	1,6
7	північно-західний	0,9	22	західний	1,4
8	західний	1,6	23	західний	1,1
9	південно-західний	1,8	24	північно-західний	1,1
10	західний	1,8	25	західний	1,5
11	північно-західний	1,3	26	західний	2,4
12	західний	1,9	27	північно-західний	2,6
13	західний	2,1	28	північно-західний	1,8
14	західний	1,6	29	північний	1,4
15	західний	1,4	30	північний	1,6

4.2 Спостереження та результати випробувань на поширення вогню збірної системи фасадної теплоізоляції з горючим утеплювачем середньої товщини 150 мм

Спостереження під час випробувань наведено у таблиці 4.2.

Таблиця 4.2

Спостереження під час випробувань

Час, хв	Спостереження
0	Запалювання модельного вогнища
6	Полум'я пульсує та виходить з віконного прорізу на висоту до 2,7 м, початок осипання зовнішнього оздоблювального шару штукатурки на обрамленні віконного прорізу
10	Полум'я пульсує та виходить з віконного прорізу на висоту до 2,7 м, в окремі моменти на висоту до 3,5 м. Осипання зовнішнього оздоблювального шару штукатурки над віконним прорізом в зоні дії полум'я на висоті до 2,7 м
15	Полум'я пульсує та виходить з віконного прорізу на висоту до 2,7 м, в окремі моменти на висоту до 3,5 м. Осипання шарів гіпсокартону у вогневій камері та віконному прорізі
20	Полум'я пульсує та виходить з віконного прорізу на висоту до 3,5 м, в окремі моменти на висоту до 4,3 м. Спалахи продуктів піролізу тривалістю до 1 с в зоні дії полум'я між обрамленням віконного прорізу та протипожежним поясом. Осипання зовнішнього оздоблювального шару штукатурки над віконним прорізом в зоні дії полум'я на висоті до 3,5 м
25	Полум'я пульсує та виходить з віконного прорізу на висоту до 4,3 м. Осипання зовнішнього оздоблювального шару штукатурки та утворення тріщин в зовнішньому армувально-захисному шарі в зоні дії полум'я на висоті до 3,5 м. Осипання зовнішнього армувально-захисного шару (до склосітки) над віконним прорізом в зоні дії полум'я на висоті до 3,0 м.
31	Гасіння штабеля у вогневій камері.

На рис. 4.4-4.10 наведено фотографії фрагмента будинку під час та після випробувань.



Рисунок 4.4 – Вид фрагмента на 5-ій хвилині випробувань



Рисунок 4.5 – Вид фрагмента на 10-ій хвилині випробувань



Рисунок 4.6 – Вид фрагмента на 15-ій хвилині випробувань



Рисунок 4.7 – Вид фрагмента на 20-ій хвилині випробувань



Рисунок 4.8– Вид фрагмента на 25-ій хвилині випробувань



Рисунок 4.9 – Вид фрагмента на 30-ій хвилині випробувань



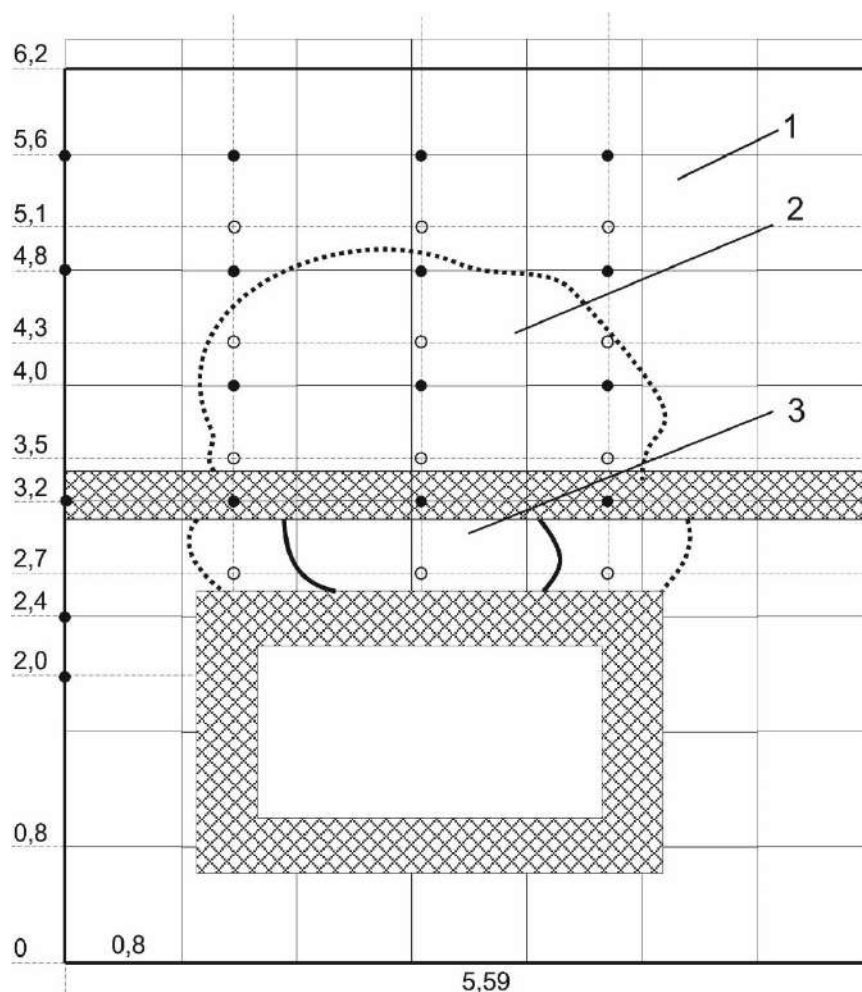
Рисунок 4.10 – Вид фрагмента після проведення випробувань

На рис. 4.11 наведено фотографію фрагмента будинку після зняття залишків оздоблювально-захисного шару конструкції фасадної теплоізоляції.



Рисунок 4.11 – Вид фрагмента зі знятим оздоблювально-захисним шаром фасадної теплоізоляції після проведення випробувань

На рис. 4.12 наведено схему пошкоджень утеплювача (пінополістирольних плит) після випробувань.



○ - термопари, які розташовано усередині збірної системи фасадної теплоізоляції;

● - термопари, які розташовано біля поверхні збірної системи фасадної теплоізоляції.

Рисунок 4.12 – Схема пошкодження утеплювача з пінополістирольних плит марки «ПСБ-С-25»:

1 - зона непошкодженого утеплювача з пінополістирольних плит марки «ПСБ-С-25»; 2 - зона частково пошкодженого утеплювача з пінополістирольних плит марки «ПСБ-С-25»; 3 - зона повністю пошкодженого утеплювача з пінополістирольних плит марки «ПСБ-С-25»

Під час випробувань не відбувалось поширення полум'я по зовнішній поверхні конструкції фасадної теплоізоляції з опорядженням штукатуркою

та утеплювачем з пінополістирольних плит за межі її безпосереднього контакту з полум'ям вогневої камери.

Результати вимірювань значення температури у вогневій камері, всередині та біля поверхні конструкції фасадної теплоізоляції наведено на рисунках 4.13-4.25.

За час проведення випробувань середнє значення температури у шарі утеплювача, що розташований на стіні Б (термопари Т45-Т48), збільшилось на 1°C.

Максимальні значення температури всередині конструкції фасадної теплоізоляції у контрольних точках на стіні А становлять:

359 °C (Т34) на відмітці 2,7 м;

227 °C (Т37) на відмітці 3,5 м;

198 °C (Т40) на відмітці 4,3 м;

96 °C (Т43) на відмітці 5,1 м.

Максимальні значення перевищення температури в контрольних точках у шарі утеплювача (пінополістиролу) відносно початкової температури в цих точках становлять:

347 °C (Т34) на відмітці 2,7 м;

215 °C (Т37) на відмітці 3,5 м;

186 °C (Т40) на відмітці 4,3 м;

84 °C (Т43) на відмітці 5,1 м.

4.3 Результати температурного розподілу у вогневій камері, біля віконного прорізу, біля зовнішньої поверхні та усередині збірної системи фасадної теплоізоляції під час випробувань

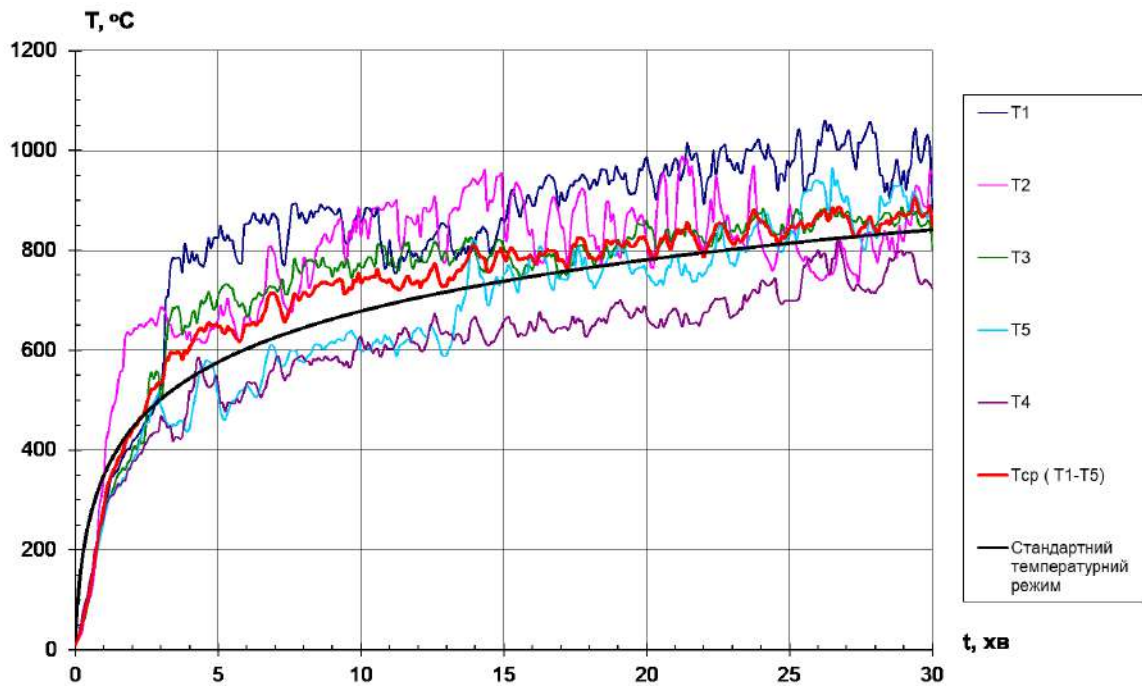


Рисунок 4.13 – Зміна температури у вогневій камері (термопарі T1-T5)

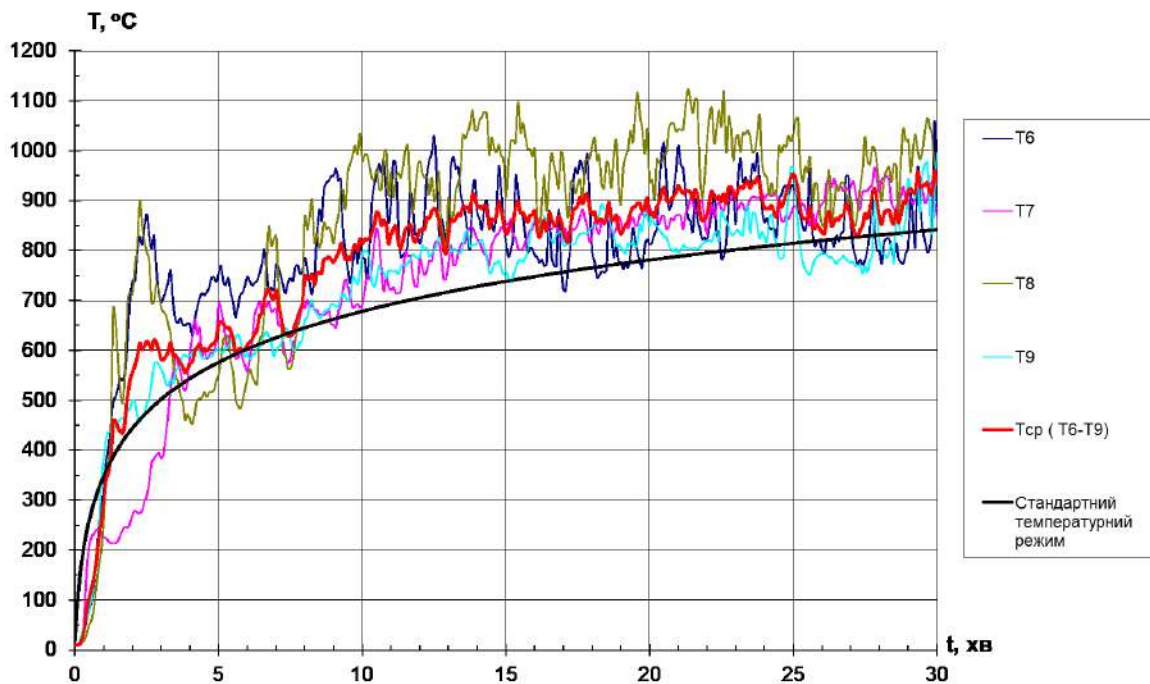


Рисунок 4.14 – Зміна температури у вогневій камері (термопарі T6-T9)

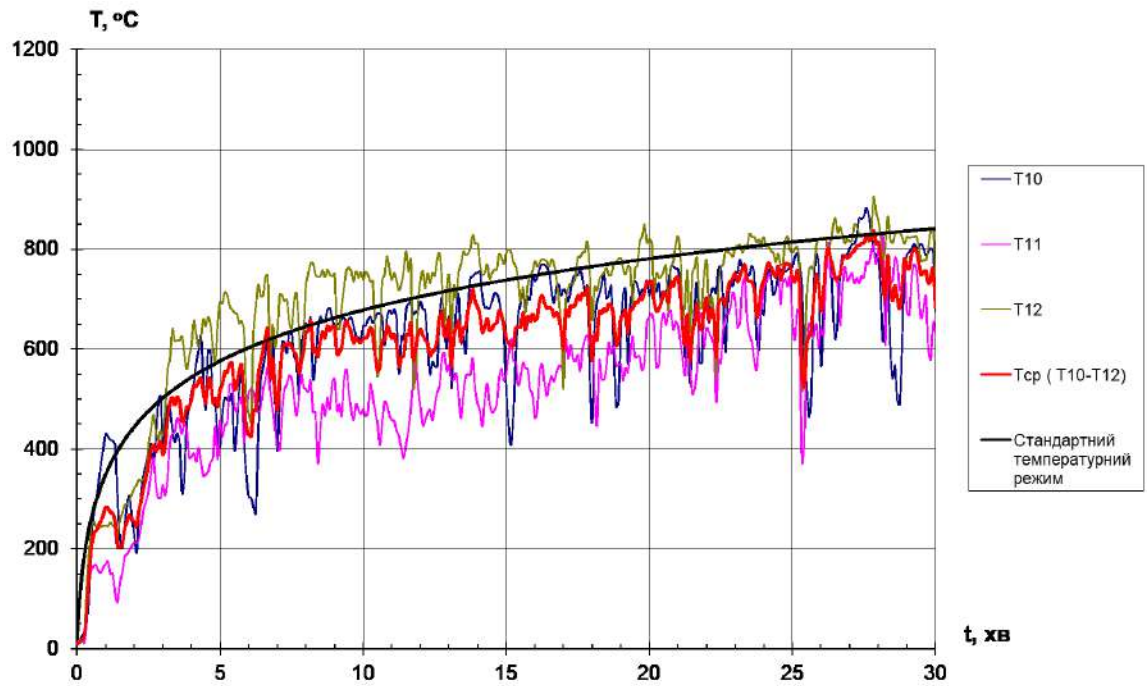


Рисунок 4.15 – Зміна температури у віконному прорізі
(термопари T10-T12)

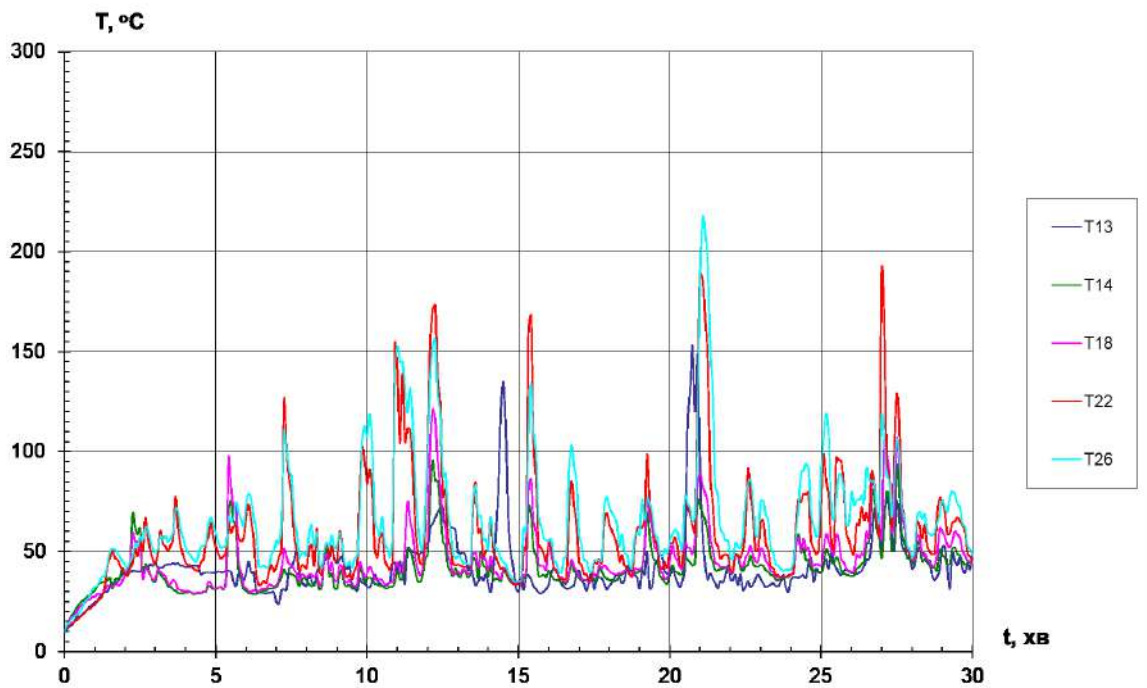


Рисунок 4.16 – Зміна температури біля зовнішньої поверхні збірної системи фасадної теплоізоляції (термопари T13, T14, T18, T22, T26)

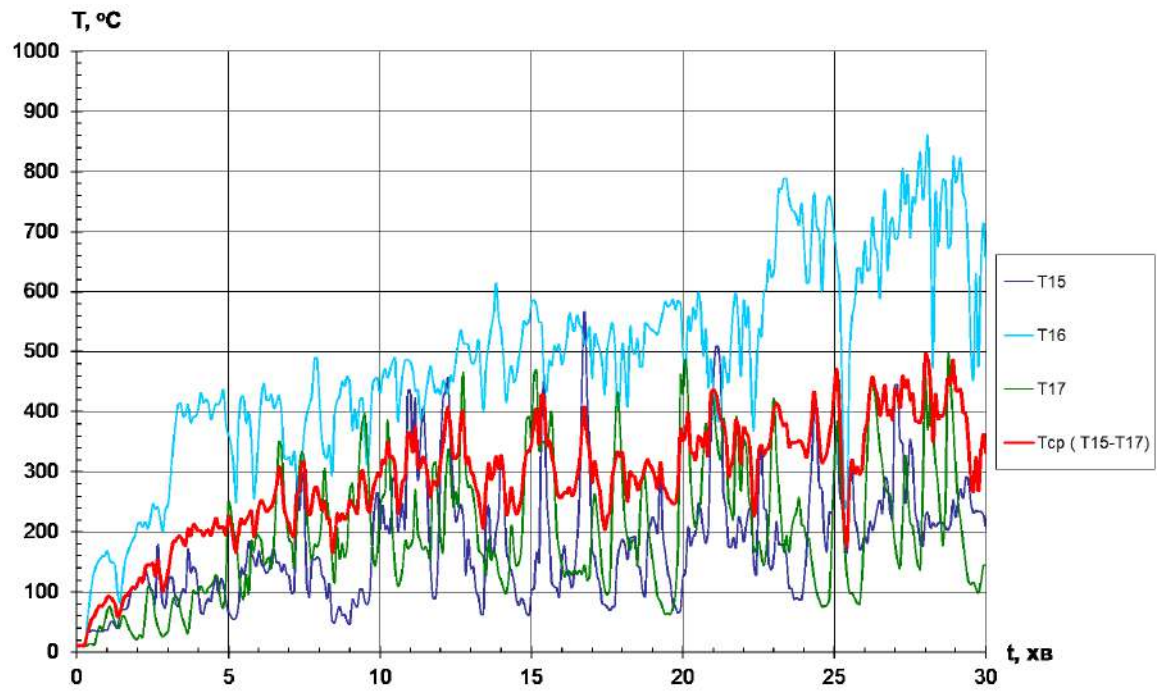


Рисунок 4.17 – Зміна температури біля поверхні збірної системи фасадної теплоізоляції (термопари T15-T17)

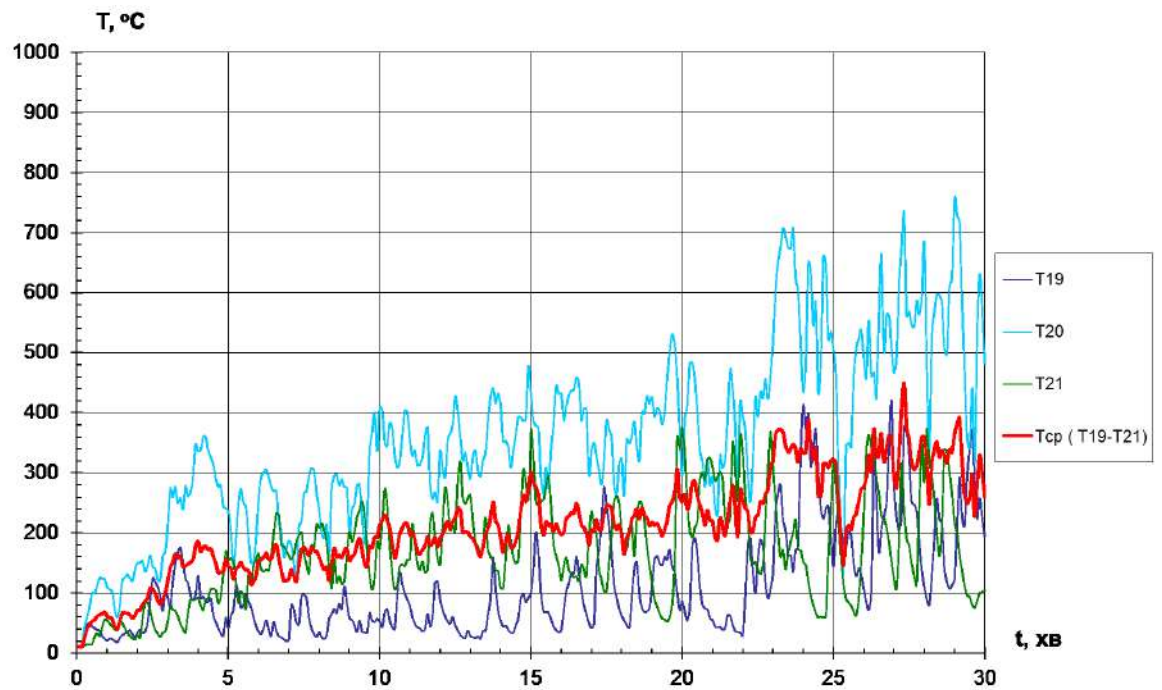


Рисунок 4.18 – Зміна температури біля поверхні збірної системи фасадної теплоізоляції (термопари T19-T21)

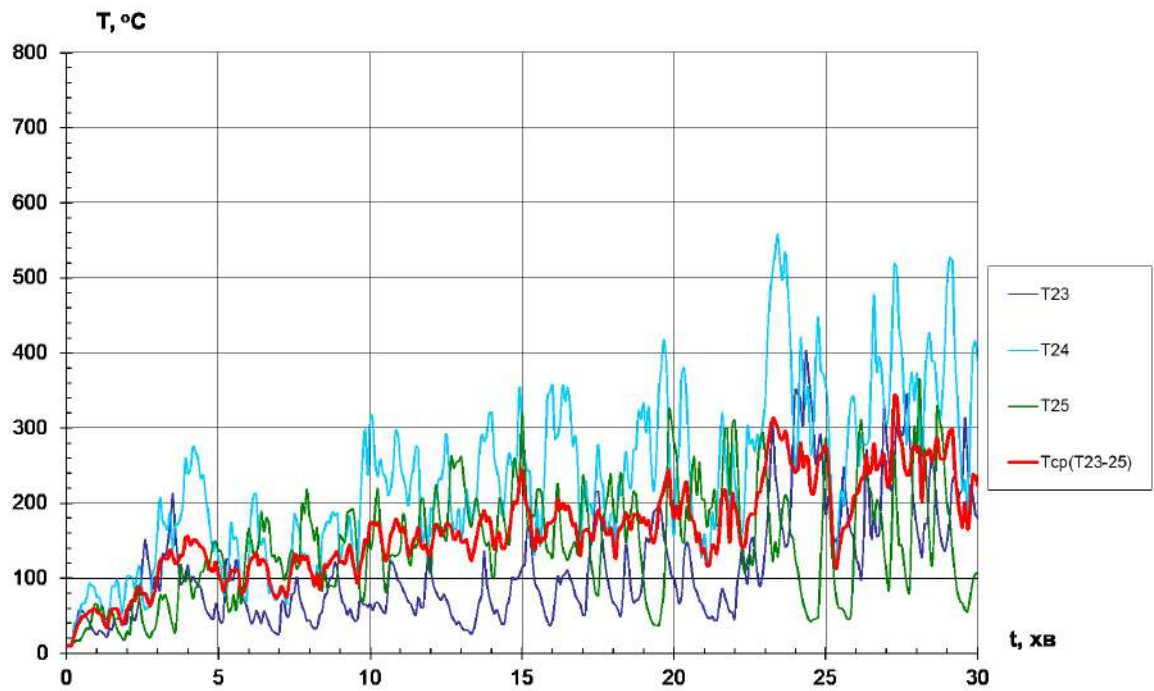


Рисунок 4.19 – Зміна температури біля поверхні збірної системи фасадної теплоізоляції (термопары T23-T25)

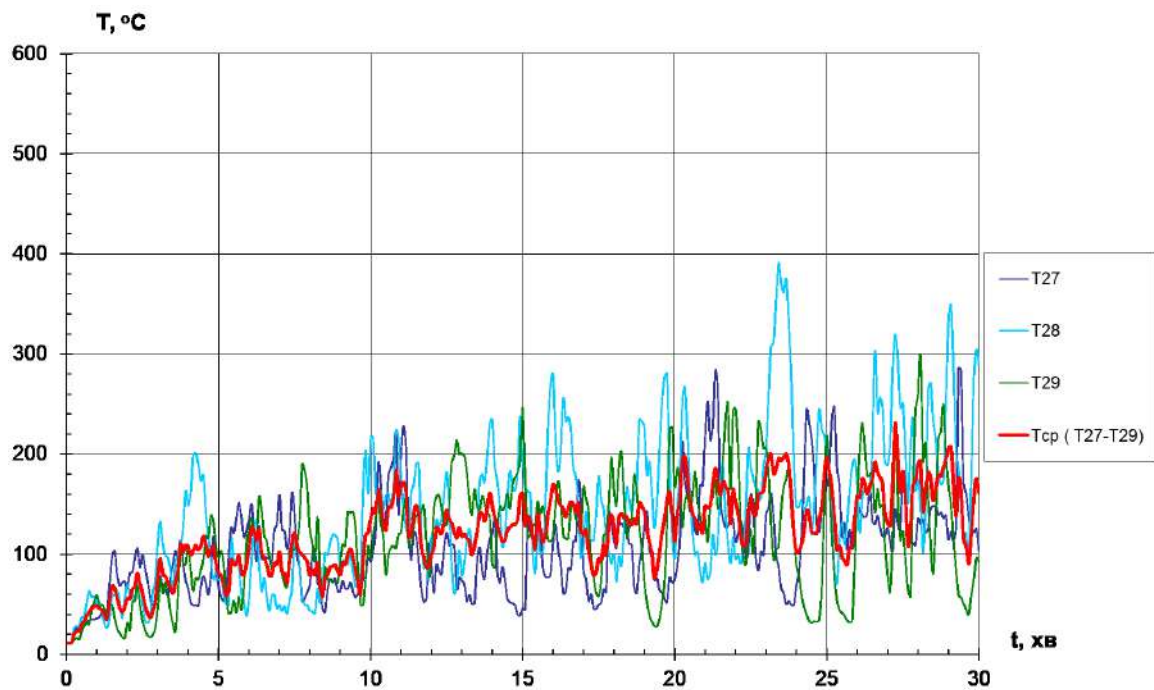


Рисунок 4.20 – Зміна температури біля поверхні збірної системи фасадної теплоізоляції (термопары T27-T29)

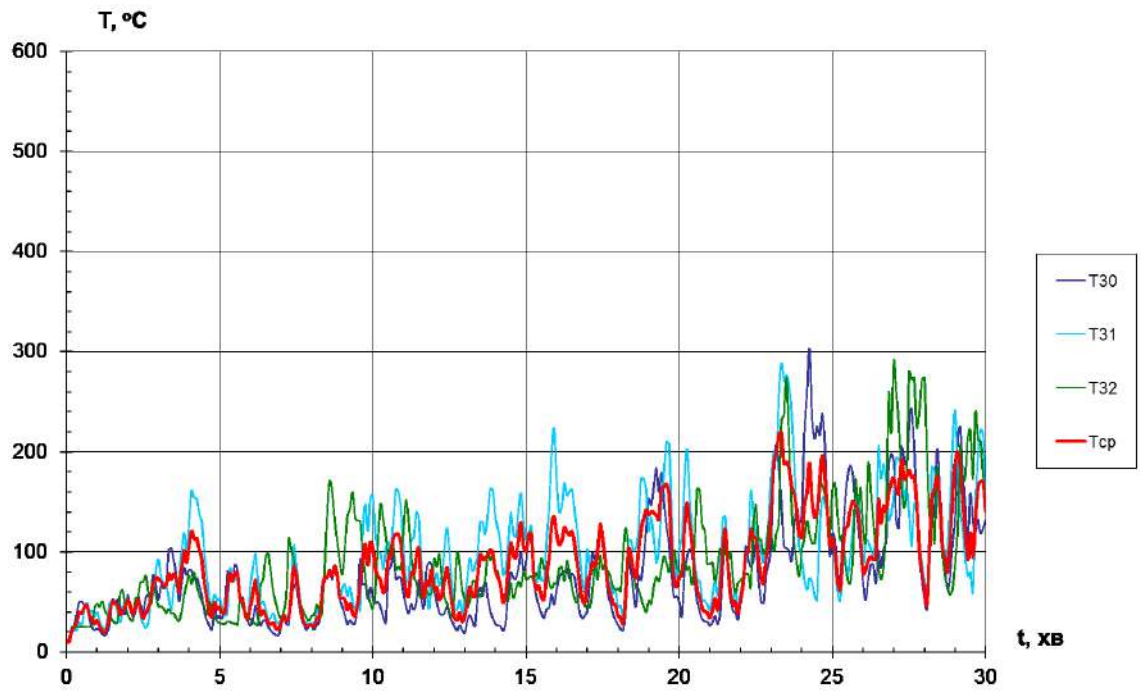


Рисунок 4.21 – Зміна температур біля поверхні збірної системи фасадної теплоізоляції (термопари T30-T32)

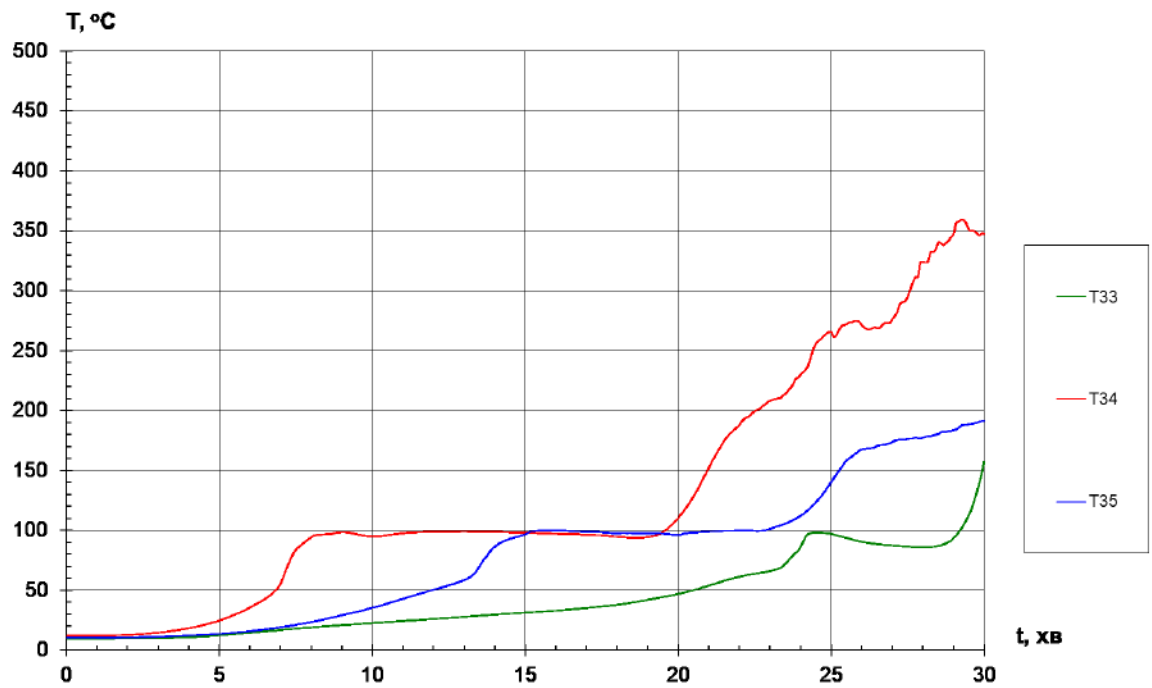


Рисунок 4.22 – Зміна температури усередині збірної системи фасадної теплоізоляції (термопари T33-T35)

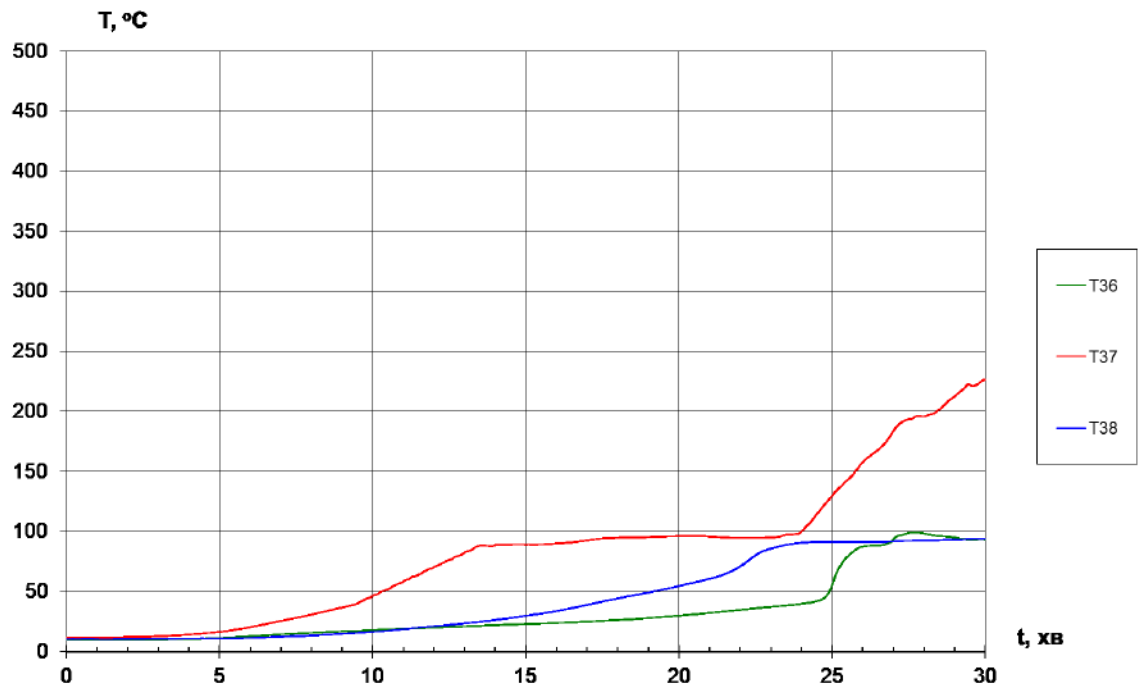


Рисунок 4.23 – Зміна температури усередині збірної системи фасадної теплоізоляції (термопари T36-T38)

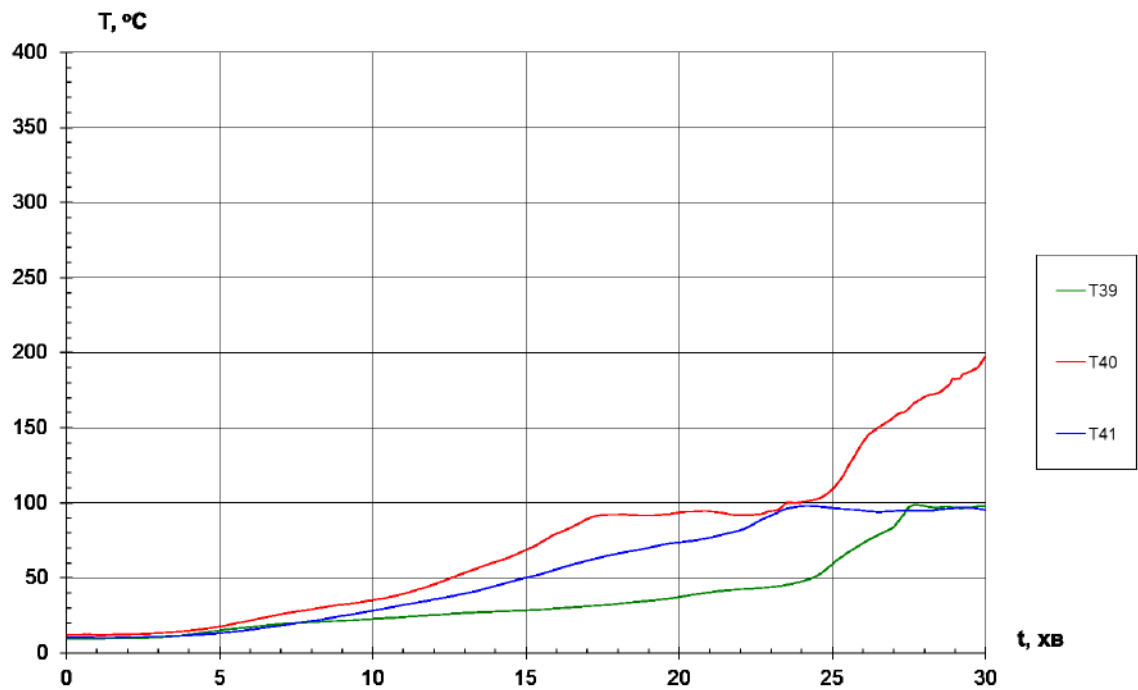


Рисунок 4.24 – Зміна температури усередині збірної системи фасадної теплоізоляції (термопари T39-T41)

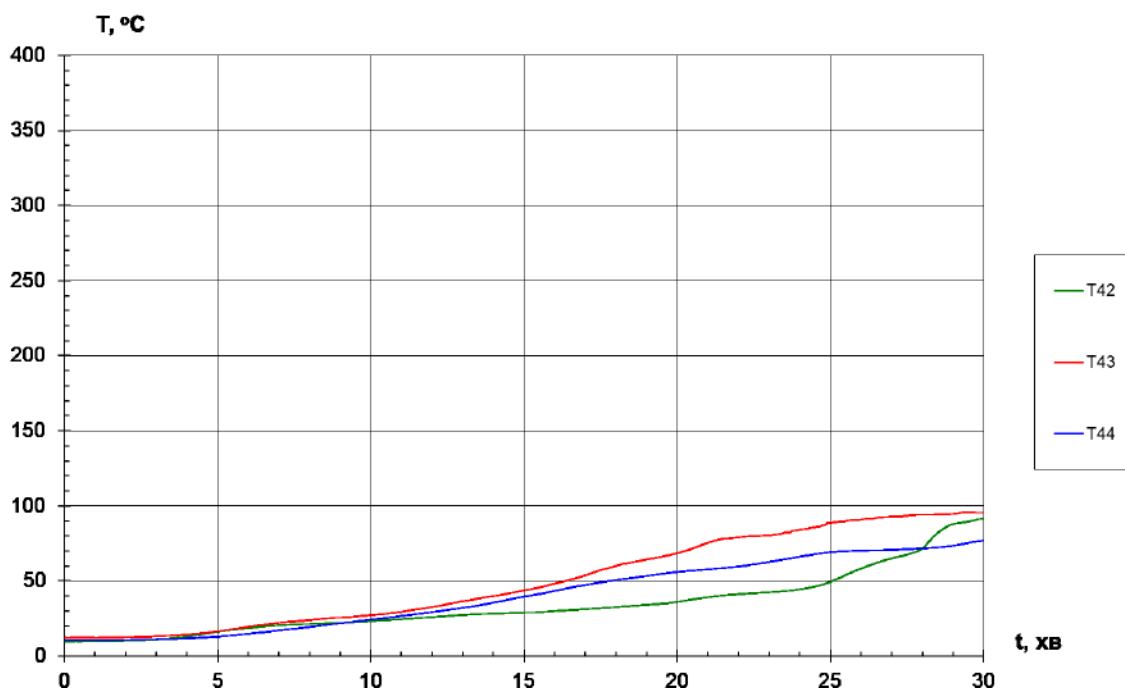


Рисунок 4.25 – Зміна температури усередині збірної системи фасадної теплоізоляції (термопари T42-T44)

Отже, за результатами натурних вогневих випробувань конструкції зовнішньої стіни із фасадною теплоізоляцією з опорядженням штукатуркою та утеплювачем з пінополістирольних плит на поширення вогню встановлено, що поширення полум'я по поверхні фасадної теплоізоляції за межі її безпосереднього контакту з полум'ям із вогневої камери не відбувалося.

Експериментальні дані показують, що максимальні значення температури всередині конструкції фасадної теплоізоляції у контрольних точках на стіні А становили: 359 °C (T34) на відмітці 2,7 м; 227 °C (T37) на відмітці 3,5 м; 198 °C (T40) на відмітці 4,3 м; 96 °C (T43) на відмітці 5,1 м. Максимальні значення перевищення температури в контрольних точках у шарі утеплювача (пінополістиролу) відносно початкової температури в цих точках становили: 347 °C (T34) на відмітці 2,7 м; 215 °C (T37) на відмітці 3,5 м; 186 °C (T40) на відмітці 4,3 м; 84 °C (T43) на відмітці 5,1 м.

4.4 Висновки до розділу

1. Випробування збірної системи фасадної теплоізоляції з горючим утеплювачем середньої товщини 150 мм на поширення вогню проводили згідно з Методикою натурних вогневих випробувань збірних систем фасадної теплоізоляції з опорядженням штукатурками та дрібноштучними елементами на поширення вогню. Сутність методу випробувань полягала у визначенні розмірів пошкодження і значення підвищення температури у конструкції збірної системи фасадної теплоізоляції, що нанесена на фрагмент двоповерхового будинку, на першому поверсі якого (у вогневій камері) створювали протягом 30 хвилин температурний режим, наближений до стандартного.

2. За результатами натурних вогневих випробувань конструкції зовнішньої стіни із фасадною теплоізоляцією з опорядженням штукатуркою та утеплювачем з пінополістирольних плит на поширення вогню встановлено, що поширення полум'я по поверхні фасадної теплоізоляції за межі її безпосереднього контакту з полум'ям із вогневої камери не відбувалося.

3. Максимальні значення температури всередині конструкції фасадної теплоізоляції у контрольних точках на стіні А становили: 359 °C (T34) на відмітці 2,7 м; 227 °C (T37) на відмітці 3,5 м; 198 °C (T40) на відмітці 4,3 м; 96 °C (T43) на відмітці 5,1 м. Максимальні значення перевищення температури в контрольних точках у шарі утеплювача (пінополістиролу) відносно початкової температури в цих точках становили: 347 °C (T34) на відмітці 2,7 м; 215 °C (T37) на відмітці 3,5 м; 186 °C (T40) на відмітці 4,3 м; 84 °C (T43) на відмітці 5,1 м.

4. Під час проведення випробування проводилися спостереження за наявністю полуменевого горіння на зовнішній поверхні зразка збірної системи фасадної теплоізоляції та на її верхньому, лівому та правому краях; за поведінкою зразка і складено хронологічний опис змін у зразку,

згідно якого вже на 6 хв випробування зафіксовано початок осипання зовнішнього оздоблювального шару штукатурки на обрамленні віконного прорізу. На 10 хв зафіксовано осипання зовнішнього оздоблювального шару штукатурки над віконним прорізом в зоні дії полум'я на висоті до 2,7 м; на 20 хв – на висоті до 3,5 м; на 25 хв – осипання зовнішнього оздоблювального шару штукатурки та утворення тріщин в зовнішньому армувально-захисному шарі в зоні дії полум'я на висоті до 3,5 м. Впродовж експериментального дослідження полум'я пульсувало та виходило з віконного прорізу на висоту від 2,7 м до 4,3 м.

5. Згідно з розділом 11 Методики натурних вогневих випробувань збірних систем фасадної теплоізоляції з опорядженням штукатурками та дрібноштучними елементами на поширення вогню випробувана збірна система фасадної теплоізоляції з горючим утеплювачем середньої товщини 150 мм вважається такою, що не поширює вогонь.

РОЗДІЛ 5. ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЗОВНІШНІХ ОГОРОДЖУЮЧИХ КОНСТРУКЦІЙ ФАСАДУ БУДІВЛІ НА ЗАПОБІГАННЯ ПОШИРЕННЯ ПОЖЕЖІ У СЕРЕДОВИЩІ FIRE DYNAMICS SIMULATOR (FDS)

5.1 Основи моделювання динаміки пожеж у FDS

Пакет комп'ютерних програм FDS (Fire Dynamic Simulator) розроблений для моделювання процесів займання і поширення пожеж [128]. Алгоритми, які увійшли в його основу, базуються на фізичних законах гідродинаміки і теплопередачі. Розробляє FDS міжнародний колектив науковців зі США, Європи і Південної Америки на чолі з Національним інститутом стандартів і технологій (NIST), а також VTT Технічним дослідницьким центром Фінляндії (VTT Technical Research Centre of Finland), який доповнив пакет програм модулем евакуації FDS+Evac.

Для тривимірної та двовимірної візуалізації результатів моделювання динаміки пожеж застосовують програму Smokeview, розробником якої є Г. Форней (Glenn Forney), науковець Інженерної лабораторії NIST.

Для моделювання пожеж у природних екосистемах та їх впливу на будівлі та споруди у NIST за керівництвом В. Мелла (William (Ruddy) Mell) розробляється доповнення до FDS, яке має назву WFDS (Wildland-Urban Interface Fire Dynamics Simulator).

5.1.1. Основні принципи, покладені в основу FDS, та задачі, які вирішують з її допомогою

Принцип роботи FDS полягає в чисельному розв'язуванні системи рівнянь Нав'є-Стокса, які описують низькошвидкісний (з швидкістю поширення до 0,3 Ма, Ма – число Маха) тепловий потік від пожежі та поширення диму. Диференціальні рівняння в часткових похідних розв'язують методом скінченних різниць (часткові похідні записують у

вигляді частки різниць) з обчисленнями на скінченній тривимірній сітці. Теплове випромінювання обчислюють з використанням методу скінченних об'ємів. Для симулювання потоків диму, роботи спринклерів і процесів поширення горючого матеріалу застосовують частинки відповідно до механіки Лагранжа.

FDS найчастіше застосовують для вирішення таких задач:

- поширення тепла і продуктів горіння від пожежі;
- радіаційно-конвективний теплообмін газів і поверхонь твердих тіл;
- спрацювання спринклерів, теплових і димових давачів;
- поширення полум'я під час пожежі;
- перебіг процесів піролізу;
- гасіння пожеж спринклерами;
- моделювання процесів евакуації.

Але дослідник за необхідності може використати можливості програми для розв'язування інших завдань, пов'язаних з пожежами.

Для роботи з FDS версії 5 необхідно персональний комп'ютер (ПК) з частотою процесора не меншою, ніж 1 ГГц та оперативною пам'яттю понад 512 Мбайт. Версія 6 потребує вже щонайменше 4 Гбайт пам'яті. Вільний об'єм жорсткого диску повинен бути достатньо великим, оскільки іноді результат лише одного розрахунку може займати біля 1 Гбайт. На теперішній час актуальними є версії програми для операційних систем (ОС) Microsoft Windows, Linux і MacOS. Найновіші версії програми (версії 6.X) орієнтовані на 64-розрядні, а попередні – на 32- і 64-розрядні ОС.

Під час моделювання обчислення можна проводити не лише на одному комп'ютері, але і на декількох, реалізуючи паралельні обчислення. В цьому випадку застосовують мультипроцесорні версії FDS. Далі зосередимося на прикладі роботи на одному ПК в ОС Windows.

Інсталяцію FDS проводять з дистрибутиву, який можна завантажити з сайту NIST за адресою <https://pages.nist.gov/fds-smv/downloads.html>. Окрім програми на сайті є повна технічна документація для роботи з програмою.

Для обговорення проблем, пов'язаних із застосуванням програми FDS, діє форум і Вікі-сторінки. За необхідності можна переглянути історію оновлень.

Для роботи з FDS потрібен текстовий редактор (наприклад, Блокнот у Windows або інший текстовий редактор), а також програма для роботи з файлами, яка входить у склад ОС (наприклад, провідник у Windows), або стороннього розробника (наприклад, Total Commander, Far Manager). Основним завданням є робота з вхідними файлами FDS, які необхідно попередньо сформулювати для моделювання, а також для перегляду результатів обчислень.

Вхідний файл FDS

Основою моделі, побудованої в FDS, є вхідний файл FDS – текстовий файл, у якому міститься інформація про об'єкт моделювання, вхідні параметри моделі, сценарій виконання та методи отримання результатів.

Вхідний файл розміщують в окремій папці. У папці Examples є вже готові приклади вхідних файлів, кожен з яких міститься в окремій папці. Перед створенням вхідного файлу створюємо окрему папку.

Створити вхідний файл можна засобами Windows (створити текстовий файл) або за допомогою Total Commander чи Far Manager (далі будемо наводити опис лише для Total Commander) за допомогою клавіш Shift+F4.

Ім'я вхідного файлу складають з послідовності символів (літер, цифр та інших, які допускаються в іменах файлів) без пробілів, а розширення – .fds, наприклад, room_1.fds.

Дані у вхідному файлі формуються у вигляді груп. Кожна група починається з символу "&", після якого записується ім'я групи. Далі після пробілу йдуть параметри та присвоєні їм значення, розділені комами. Для присвоєння параметрові значення записуємо ім'я параметра, знак "=" та відповідне значення. Значення можуть бути числовими (Integer – цілими, Real – дійсними), символьними (String) – послідовність символів, взятих в апострофи) та логічними (Logical): .TRUE. – істина, .FALSE. – хибне).

Якщо значень декілька, то вони розділяються комами. Розділяти параметри можна і з допомогою розривів стрічок, записуючи кожне значення в окремому рядку. Завершує групу нахилена риска "/".

Після нахиленої риски можемо записувати довільні коментарі як у тому ж рядку, так і з нового рядка. Коментарі завершуються з початком нової групи (символом "&", який повинен бути першим у рядку групи). Зауважимо, що нахилену риску можна використовувати для оперативного відключення групи (без видалення) під час відлагоджування моделі.

Вхідний файл має певну структуру, в якій деякі групи можна переставляти місцями. Початок файлу – група HEAD, кінець – TAIL.

Після групи HEAD потрібно задати час моделювання у групі TIME, вказати розміри області, у якій відбувається моделювання, та параметри сітки, в вузлах якої проводяться розрахунки. Для цього застосовують групу MESH. Далі описують властивості горючої речовини у групі MATL, а реакцію горіння – у REAC. Об'єкти, які горять, або є перешкодами для розповсюдження горіння, описують у групах OBST, а отвори – VENT.

Для моделювання процесу горіння застосовують групи, за допомогою яких здійснюють підпалювання, задавши місце розташування об'єкта, тривалість запалювання, потужність джерела запалювання. У вхідному файлі також використовують групи для отримання інформації про процес моделювання: температуру, тепловий потік, вміст кисню та ін.

Після завершення редагування вхідного файлу його запускають на виконання.

5.1.2. Основи моделювання у FDS

Динаміку пожежі досліджують після запуску виконання програми відповідно до умов і правил, наведених у вхідному файлі.

В процесі моделювання можна переглядати результати обчислень візуально або у файлах даних. У будь-який момент можна припинити роботу програми. Зауважимо, що моделювання можна коректним

способом призупинити і продовжити. У разі необхідності можна внести зміни у вхідний файл.

Запуск програми FDS

Для запуску FDS у Windows застосовують виконувальний файл `fds.exe`, який знаходиться в папці `Bin`. Операційна система після інсталювання FDS дозволяє запускати цей файл з будь-якого місця диску за відповідною командою. З цим файлом повинні бути асоційовані вхідні файли (за розширенням `.fds`). Запуск процесу обчислення у випадку однопроцесорної версії можна здійснити декількома способами:

- вибрати потрібний вхідний файл і двічі натиснути ліву клавішу миші (або Enter на клавіатурі);

- натиснути клавішу Пуск, вибрати пункт меню, набрати з клавіатури команду `cmd`, у вікні з командного рядка за допомогою команди `cd` перейти у папку з вхідним файлом, набрати команду `fds <ім.'я вхідного файлу>` і натиснути Enter. Наприклад, якщо вхідним файлом є `room_1.fds`, то для запуску слід набрати командний рядок: `fds room_1.fds`;

- у Total Commander перейти в папку з вхідним файлом, який запускаємо, у командному рядку набрати `fds i`, розмістивши курсор на вхідному файлі FDS, натиснути `Ctrl+Enter`, а після того – Enter.

Якщо вхідний файл складений без помилок, тоді після запуску розпочнеться його виконання. У разі виявлення помилки програмою, виконання припиняється, а у поточній папці створюється файл з розширенням `.out`, у якому записується повідомлення про помилку. Повідомлення, як правило, містить назву групи і порядковий номер групи у вхідному файлі.

Послідовність дій для запуску обчислень FDS на декількох комп'ютерах описана в документації до програми.

Зупинення і продовження виконання програми FDS

Моделювання у FDS – процес тривалий. У разі виявлення помилки і зупинки виконання програми (закриття вікна) повторний запуск буде

проводитися з початку. Але FDS передбачає можливість призупинення і відновлення виконання розрахунків з поточного моменту часу. Її реалізація потребує виконання наступних дій:

- зупиняти обчислення потрібно створенням в папці з вхідним файлом FDS файлу з іменем, заданим в групі HEAD за допомогою параметра CHID, і розширенням .stop (наприклад, якщо в HEAD задано CHID = 'room1', тоді треба створити або скопіювати з іншої папки файл room1.stop);

- для продовження обчислень потрібно у групі MISC вхідного файлу задати параметр RESTART = TRUE, у папці з вхідним файлом видалити файл з розширенням .stop і запустити на виконання вхідний файл FDS.

Прямокутна геометрія

Оскільки моделювання відбувається на прямокутній сітці, це зумовлює обмеження на форму геометричних об'єктів. Для успішного моделювання межі об'єктів повинні бути паралельними до ліній сітки і проходити ними. Це не завжди досягається на практиці, оскільки межі можуть бути під деяким кутом до ліній сітки і не проходити її вузлами. У цьому випадку FDS самостійно замінює прямі ламаними та припасовує об'єкти до вузлів сітки, незначно змінюючи їх розміри. У деяких випадках, особливо за невеликих розмірів порівняно з розмірами обчислювальної сітки (наприклад, плоских та тонких поверхонь, це призводить до нехтування об'єктів програмою та їх неврахування в процесі моделювання. У цьому випадку можна порекомендувати зменшити розміри сітки, що дозволить врахувати незначні за розмірами об'єкти, проте призведе до збільшення обсягу та сповільнення обчислень.

Є значні проблеми, пов'язані з прямокутною геометрією, і в моделюванні об'єктів складної форми, наприклад, кулястої чи циліндричної. У такому випадку або замінюють об'єкт рівновеликим предметом прямокутної форми, або формують його з прямокутних паралелепіпедів. Аналогічно моделювання меж об'єктів, які не є

паралельними до ліній сітки, проводиться заміною площини ступінчатою поверхнею. У таких випадках процеси горіння і поширення вогню будуть дещо відрізнятися від реальних.

Поширення пожежі

FDS розроблена для моделювання пожеж у промислових масштабах. Тому з її допомогою найточніше визначають швидкість тепловиділення і швидкість тепло- та масоперенесення. В цьому випадку модель прогнозує інтенсивність теплового потоку і температуру з точністю 10-20 % в залежності від розмірів обчислювальної сітки. Проте у випадку, коли передбачувана швидкість тепловиділення є точніша, ніж визначена, це підвищує невизначеність моделі. Це пов'язане з тим, що властивості об'єктів і горючих матеріалів не завжди є відомими, фізичні процеси горіння та тепломасоперенесення є складнішими, ніж описані у моделях FDS, а також результати обчислень є чутливими як до фізичних (щільність, теплопровідність та ін.), так і до чисельних (розміри сітки та ін.) параметрів.

Горіння

В основу FDS покладено модель горіння, яка базується на суміші фракцій. Це означає припущення, що кількість горючої суміші газів у даній точці простору має певне значення, горіння контролюється сумішшю, а реакція горючого матеріалу і окисену є дуже швидкою незалежно від температури. Для великомасштабних, добре вентильованих пожеж це припущення є добрим. Проте якщо вогонь знаходиться в недостатньо вентильованому приміщенні, або якщо вводиться флегматизатор горіння, наприклад, водяна пара або CO_2 , горючий матеріал і кисень можуть змішуватись і не горіти, згідно з низкою емпіричних критеріїв. Це обмежує можливість застосування FDS для моделювання процесів пожежогасіння у подібних випадках.

Радіаційний теплообмін

Радіаційне перенесення тепла в FDS базується на рівнянні перенесення випромінювання, яке розв'язується для випадку сірого газу методом скінченних об'ємів. Основними обмеженнями цього методу є те, що коефіцієнт поглинання газоподібних продуктів горіння є функцією їх складу і температури, у зв'язку з чим хімічний склад димчастого газів, отриманий в результаті застосування спрощеної моделі горіння, особливо, вміст сажі, може впливати на поглинання тепла і випромінювання. Іншою проблемою є те, що перенесення випромінювання дискретизується через приблизно 100 просторових кутів, що зумовлює те, що на значній відстані від локалізованого джерела випромінювання або полум'я, дискретизація приводить до нерівномірного розподілу енергії випромінювання. Ця помилка називається "ефект променя" і їх можна побачити в візуалізації поверхневих температур, де "гарячі точки" показують ефект скінченної кількості просторових кутів. Вирішення цієї проблеми можливе за рахунок збільшення кількості просторових кутів, але тоді зросте час обчислення. Хоча у більшості випадків радіаційний потік на далекій відстані не настільки важливий, як у ближній зоні, де охоплення за кількістю просторових кутів набагато краще.

Обчислювальна область і обчислювальна сітка

Для моделювання об'єктів і процесів тепломасоперенесення під час пожежі застосовують обчислювальну область, яка є об'єднанням прямокутних паралелепіпедів, грані яких паралельні до координатних площин, а перетином є суміжні грані. У найпростішому випадку обчислювальною областю є прямокутний паралелепіпед. В обчислювальній області задають обчислювальну сітку, яка складається з вузлів, розташованих на паралельних до осей координат прямих.

5.1.3 Результати моделювання, їх обробка і візуалізація

Метою моделювання пожеж є отримання різноманітних числових показників, які характеризують процес виникнення, поширення і згасання пожежі. За результатами моделювання можна зробити висновки щодо пожежної безпеки будівель і споруд. Для цього отримані значення потрібно обробити у відповідних програмах, наприклад, Excell, Mathcad, Matlab, відповідними математичними методами, побудувати графіки залежностей та проаналізувати їх.

Також актуальним результатом моделювання є візуалізація процесів поширення вогню, диму, часток газу чи рідини. Поведінку пожежі також потрібно проаналізувати. Результати візуалізації можна використати для планування заходів пожежогасіння, евакуації людей і матеріальних цінностей.

Вихідні файли FDS

FDS в процесі роботи формує низку вихідних файлів різного типу. Наведемо опис деяких типів файлів.

Імена файлів формуються на основі заданого в HEAD параметра CHID. Задана послідовність символів стає іменем або частиною імені файлу. Розширення файлів залежать від типу.

Швидкість тепловиділення вогнем HRR та інші глобальні енергетичні показники, зокрема, втрати теплового випромінювання на межі обчислювальної області RAD_LOSS, втрати енергії внаслідок конвективного теплообміну на межі обчислювальної області CONV_LOSS, втрати енергії внаслідок поглинання твердими тілами COND_LOSS, сумарна масова швидкість вигорання BURN_RATE та сумарний фоновий тиск окремих зон ZONE_01 записуються в файл CHID_hrr.csv. Інформація записується у стовпчики, першим є час, а наступні – наведені вище показники.

Дані про сумарну масу газів та окремих компонентів в обчислювальній області в кожен момент часу записуються у файл CHID_mass.csv.

Візуалізація результатів моделювання

Аналіз результатів моделювання зазвичай проводять за числовими даними, зафіксованими у вихідних файлах. Однак FDS має унікальну можливість візуального відображення процесів моделювання за допомогою програми Smokeview.

Основи роботи в Smokeview

Програма Smokeview використовується для створення дво- та тривимірних зображень обчислювальної області, у якій відбувається моделювання пожеж. Для перегляду результатів моделювання FDS формує у папці з вхідним файлом вихідний файл CHID.smv, де ім'я файлу задано параметром CHID у групі HEAD вхідного файлу FDS. Цей файл призначений для виконання в Smokeview. Окрім нього можуть застосовуватися й інші додаткові файли в тій же папці.

Програма Smokeview має різноманітні можливості для належного відображення динаміки процесів горіння. Запуск на виконання файлу з розширенням .smv можна здійснити декількома способами:

- вибрати потрібний файл з розширенням .smv і двічі натиснути ліву клавішу миші (або Enter на клавіатурі);
- натиснути клавішу Пуск, вибрати пункт меню, набрати з клавіатури команду cmd, у вікні з командного рядка за допомогою команди cd перейти у папку з вихідним файлом, набрати команду smokeview <ім'я файлу з розширенням .smv> і натиснути Enter. Наприклад, якщо вихідним файлом є room_1.smv, то для запуску слід набрати командний рядок: smokeview room_1.smv;
- у Total Commander перейти в папку з файлом, який запускаємо, у командному рядку набрати smokeview і, розмістивши курсор на файлі з розширенням .smv, натиснути Ctrl+Enter, а після того – Enter.

Після запуску завантажуються два вікна програми. В одному з вікон відображається у вигляді текстової інформації процес роботи програми Smokeview, а в іншому – графічне зображення процесу моделювання. При цьому відображення здійснюється в просторі, який з допомогою миші за натиснутої лівої клавіші можна обертати у довільному напрямі для зручності перегляду процесів горіння. У верхній частині вікна графічного відображення наведено версію Smokeview. У нижній частині є номер кадру і момент часу поблизу індикатора перебігу процесу. В залежності від налаштувань візуалізації відображається одна з шкал – температури, швидкості, інтенсивності теплового потоку тощо.

Налаштування візуалізації здійснюється з допомогою меню, яке викликається правою клавішею миші на вікні з графічним зображенням. Розглянемо структуру меню Smokeview та найбільш вживані команди.

Пункт меню Load/Unload містить підпункти, які використовуються для завантаження елементів візуалізації. Найважливішим є підпункт 3D smoke, за допомогою якого завантажують відображення часток диму (SOOT MASS FRACTION) чорним кольором і полум'я (HRRPUV) оранжевим кольором. За необхідності можна незалежно вмикати і вимикати перегляд процесу горіння і поширення диму. У підпункті Slice file вибирають поперечний переріз обчислювальної області, у якому за допомогою кольорів відображається поле швидкості тепловиділення (HRRPUV), сумішей фракцій (MIXTURE FRACTION) і температур (TEMPERATURE). Підпункт Boundary file призначений для відображень на границі обчислювальної області і об'єктів швидкості горіння (BURNING RATE), теплового потоку (GAUGE HEAT FLUX) і температури стін (WALL TEMPERATURE). Підпункт Plot3d file вмикає можливість візуалізації поля температур, швидкостей переміщення газів і тепловиділення.

5.2 Результати комп'ютерного моделювання поширення пожежі поверхнею збірних систем фасадної теплоізоляції у середовищі FDS

Для визначення температури на поверхні збірних систем фасадної теплоізоляції ми використовували комп'ютерну систему PyroSim, яка є користувацьким інтерфейсом для програми Fire Dynamics Simulator (FDS). Система FDS застосовує чисельні методи для розв'язання повної системи диференціальних рівнянь Нав'є-Стокса, щоб визначити температуру та інші небезпечні фактори під час пожежі. Розробку та реалізацію цих алгоритмів у FDS, а також розрахунки і візуалізацію результатів, здійснює Національний інститут стандартів і технологій (National Institute of Standards and Technology – NIST). Крім того, розробник провів верифікацію та валідацію результатів розрахунків у широкому діапазоні сценаріїв пожеж. [129, 130].

Для візуалізації результатів розрахунків використовується програмний модуль PyroSim Smokeview, який дозволяє створювати графічні зображення розподілу температури. Ця система також дозволяє відстежувати динаміку температурних полів та анімаційно відтворювати процес нагрівання. Крім того, система забезпечує візуалізацію задимлення та розподілу концентрації продуктів горіння. Алгоритми FDS базуються на чисельному розв'язанні диференціальних рівнянь Нав'є-Стокса з урахуванням припущення, що теплові потоки під час пожежі мають низьку швидкість та залежать від температури, з відповідними закономірностями утворення.

Основною метою даних досліджень було визначення параметрів вогневого випробування конструкції зовнішньої стіни із фасадною теплоізоляцією з опорядженням штукатуркою на поширення вогню за допомогою комп'ютерного моделювання, відтворення належним чином реальних умов вогневих випробувань та перевірка розробленої моделі шляхом порівняння отриманих даних з результатами експериментальних досліджень.

Крок розрахункової сітки FDS-моделі становив $0,1 \times 0,1$ м, що обумовлено геометричними розмірами моделі конструкції фрагмента будинку для випробувань та кратності розміру комірки сітки. За сценарієм змодельованої пожежі вона виникає на першому поверсі, а утворюваний тепловий потік та полум'я вільно поширюються із вікна на першому поверсі.

Загальний час проведення комп'ютерного моделювання з визначення параметрів вогневого випробування системи фасадної теплоізоляції на поширення вогню склав 169 год. Вигляд розрахункової моделі визначення параметрів вогневого випробування конструкції зовнішньої стіни із фасадною теплоізоляцією з опорядженням штукатуркою на поширення вогню, виконаний в PyroSim наведено на рис. 5.1.

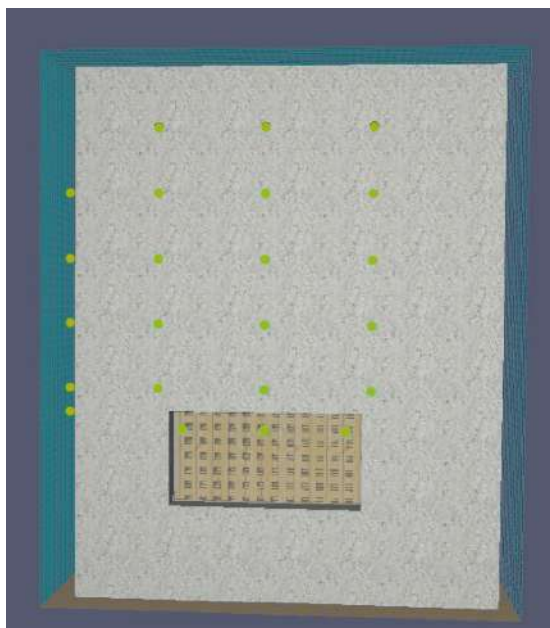


Рисунок 5.1 – Загальний вигляд розрахункової моделі конструкції зовнішньої стіни із фасадною теплоізоляцією з опорядженням штукатуркою на поширення вогню

Залежність потужності пожежі від часу та вигляд фрагменту будинку під час комп'ютерного моделювання на різні моменти часу зображено на рис. 5.2 та 5.3.

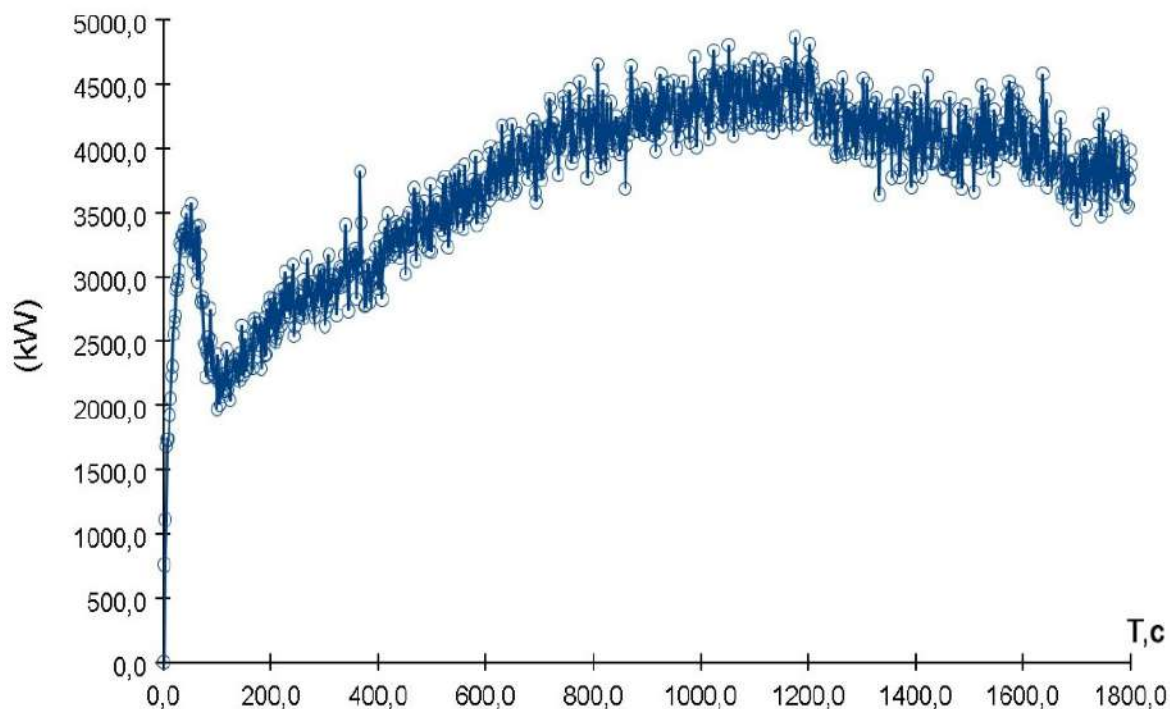


Рисунок 5.2 – Графік потужності виділення тепла від часу

В результаті чисельного моделювання було встановлено, що максимальна потужність пожежі досягається приблизно на 1200-й секунді (20-й хвилині) і складає 4,6 кВт. При цьому, локальні температури під час пожежі досягають 660-960°C, а середня температура в зоні горіння (вогняна камера) на 20-й хвилині становить 760-780°C.

На основі моделювання було побудовано температурні розподіли прогріву фасаду розрахункової моделі. Результати моделювання та візуалізацію пожежі наведено на рис. 5.3 і 5.4.

Зображення фрагменту будинку в процесі комп'ютерного моделювання в різні моменти часу представлено на рис. 5.3.

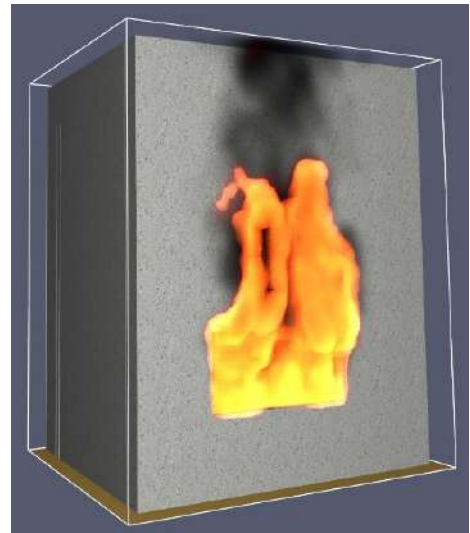
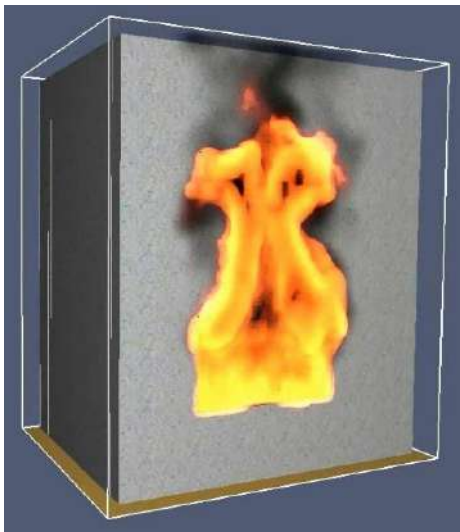
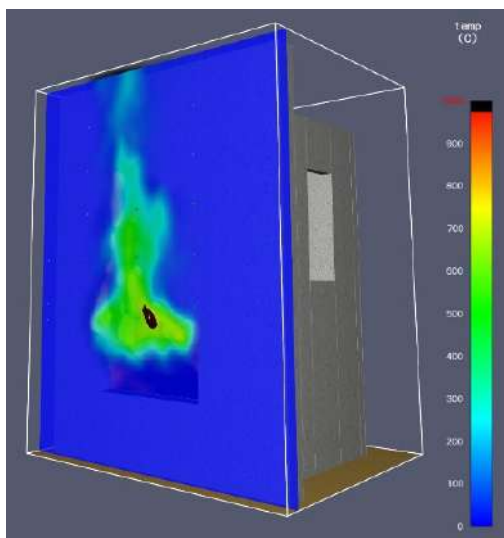
*a**б**в**г**д**е*

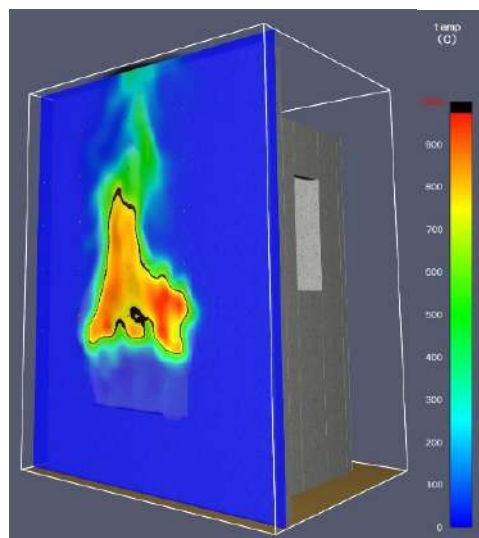
Рисунок 5.3 – Вигляд фрагмента будинку під час моделювання на моменти часу від початку: *a* – 1 хв; *б* – 5 хв; *в* – 10 хв; *г* – 15 хв; *д* – 20 хв; *е* – 25 хв; *є* – 30 хв

За допомогою комп'ютерного моделювання було проведено прогнозування динаміки розвитку та поширення небезпечних факторів пожежі, таких як дим, температура, чадний газ і т. д. Також були отримані числові та графічні дані щодо температури продуктів горіння та теплового потоку, розподілу температури у вогневій камері, всередині та на поверхні фасадної теплоізоляційно-оздоблювальної системи (рис. 5.4), а також потужності виділення тепла (HRR) (рис. 5.2).

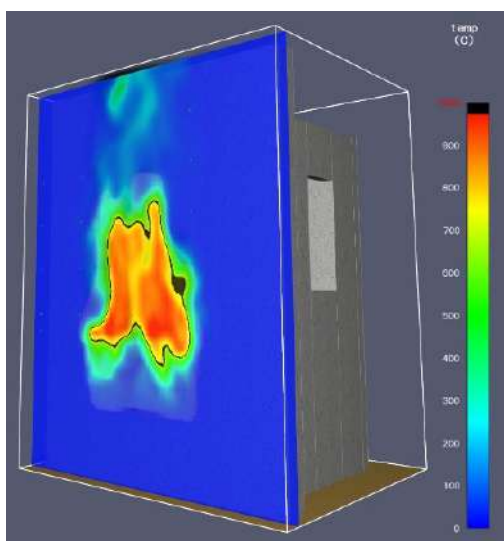
Отримані результати чисельного моделювання динаміки розвитку та поширення пожежі по поверхні теплоізоляційно-оздоблювальної системи демонструють досить високу відповідність з результатами досліджень, проведених зарубіжними вченими.



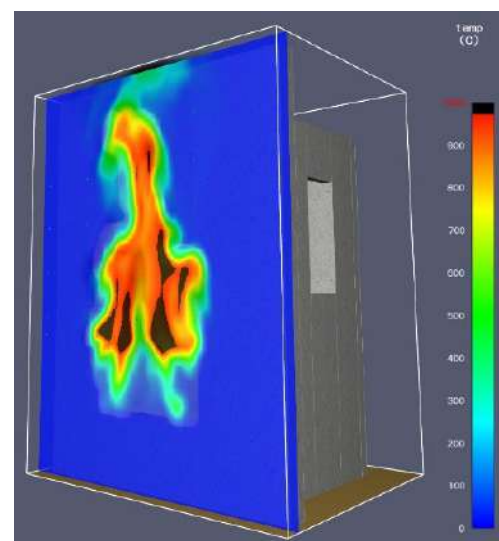
а



б



в



г

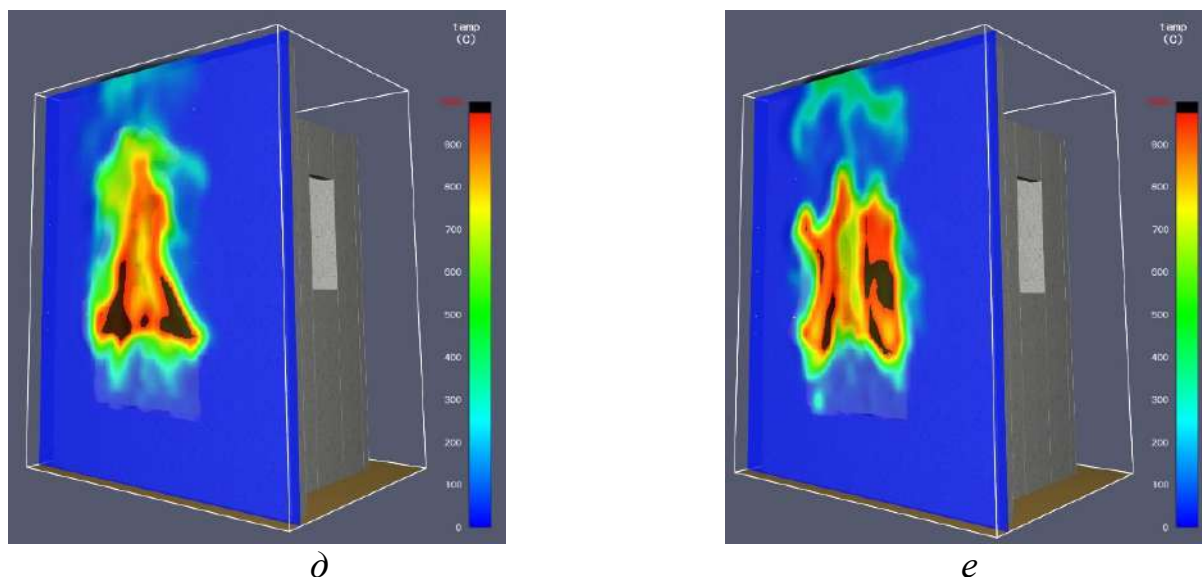


Рисунок 5.4 – Температурний розподіл на поверхні стіни будинку під час моделювання на моменти часу від початку: *a* – 1 хв; *б* – 5 хв; *в* – 10 хв; *г* – 15 хв; *д* – 25 хв; *е* – 30 хв

Результати моделювання за допомогою FDS використовувались для чисельної оцінки температурних значень у вогневій камері, в середині та біля поверхні фасадної теплоізоляційної конструкції, з метою порівняння їх з експериментально отриманими даними (рис. 5.5-5.13).

Отримані результати чисельного моделювання параметрів пожежного випробування системи фасадної теплоізоляції у середовищі FDS свідчать про те, що загальне стандартне відхилення в теоретичних даних було вище, ніж в результатах експериментальних досліджень.

Загальні значення температур всередині вогневої камери, визначені експериментально та чисельно, різнилися на 12-16 %. Температурні значення у віконному прорізі моделі були занижені на 16-18 %, а температура поблизу поверхні фасадної теплоізоляційної системи виявилася як завищеною на 10 % (T16, T20) так і заниженою на 14 % (T17, T21, T19).

Температурні показники всередині фасадної теплоізоляційної системи не перевищували експериментальні дані, а середнє відхилення температурних значень становило 6%.

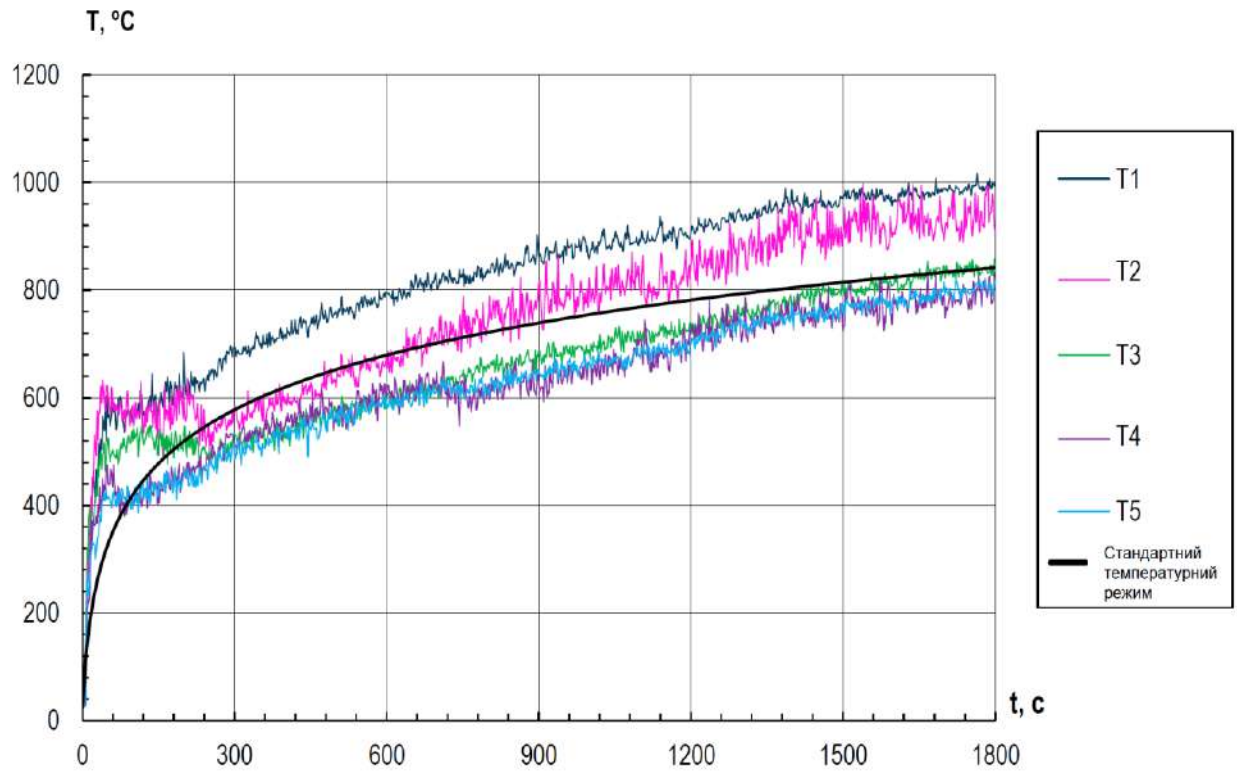


Рисунок 5.5 – Зміна температури у вогневій камері (термопари T1-T5)
за результатами FDS-моделювання

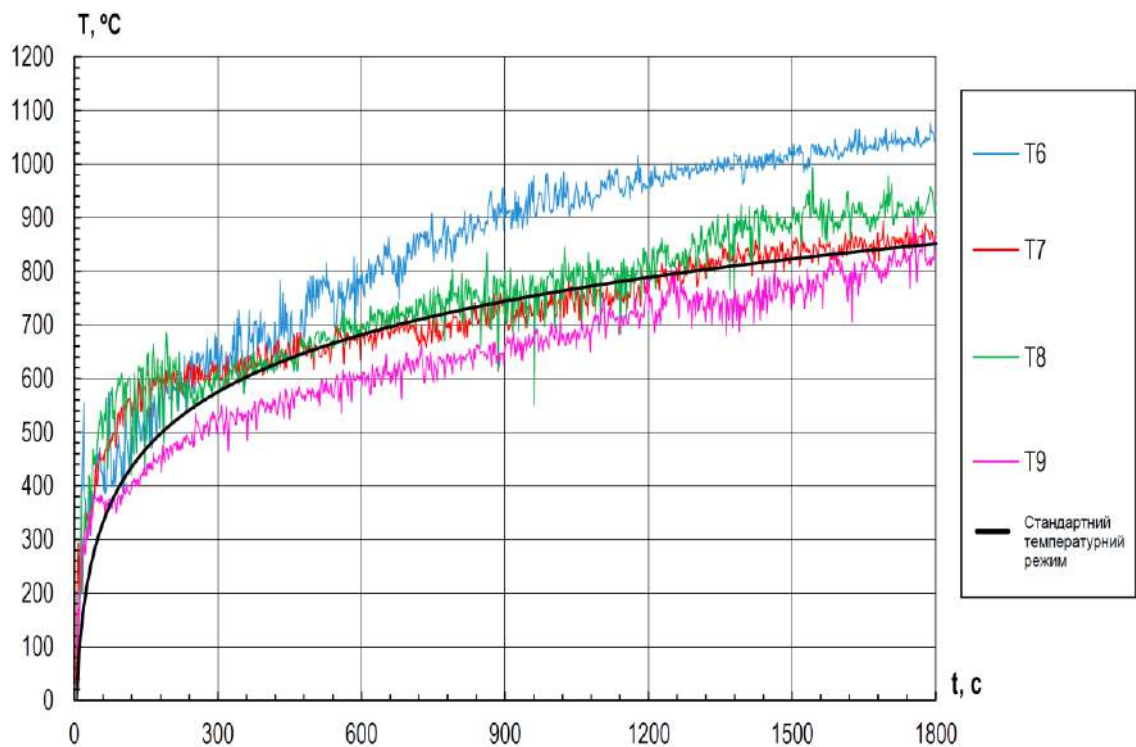


Рисунок 5.6 – Зміна температури у вогневій камері (термопари T6-T9):
за результатами FDS-моделювання

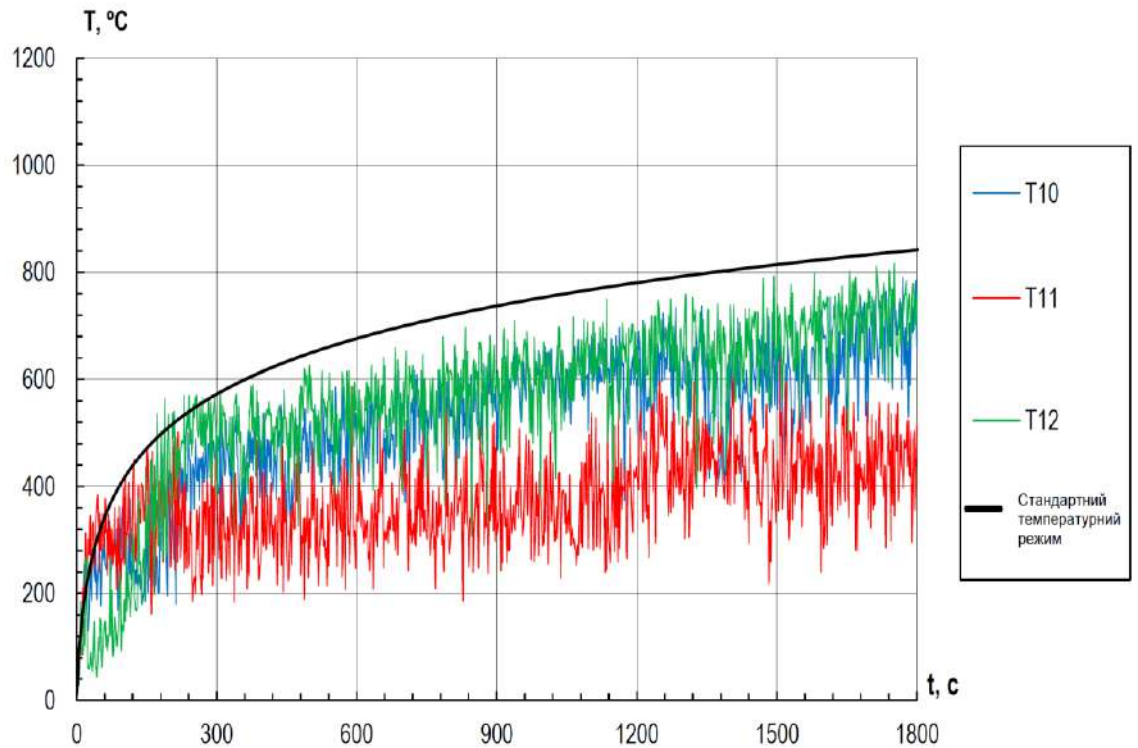


Рисунок 5.7 – Зміна температури у віконному прорізі (термопари T10-T12) за результатами FDS-моделювання

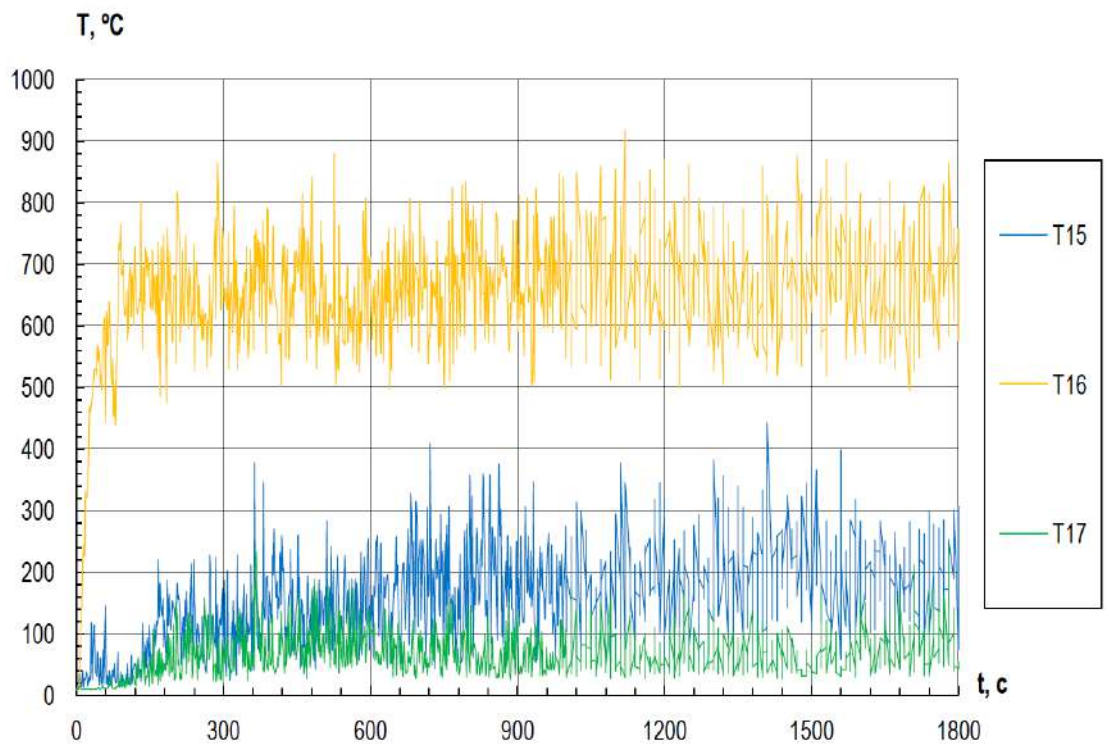


Рисунок 5.8 – Зміна температури біля поверхні системи фасадної теплоізоляції (термопари T15-T17) за результатами FDS-моделювання

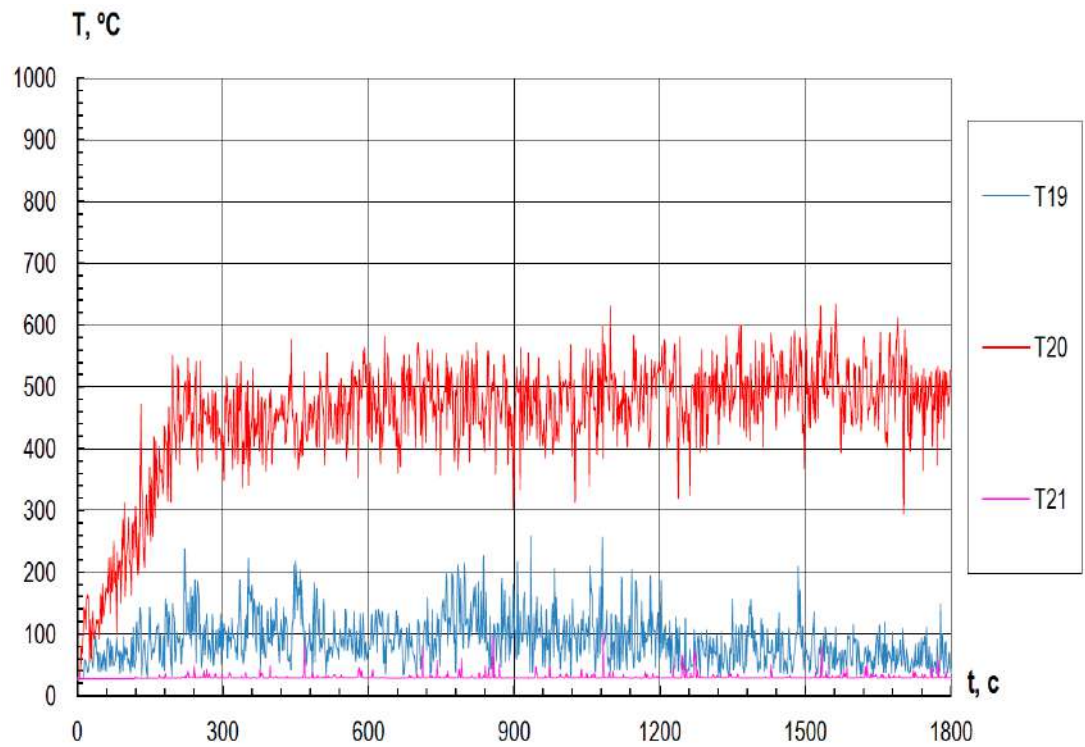


Рисунок 5.9 – Зміна температури біля поверхні системи фасадної теплоізоляції (термопари T19-T21) за результатами FDS-моделювання

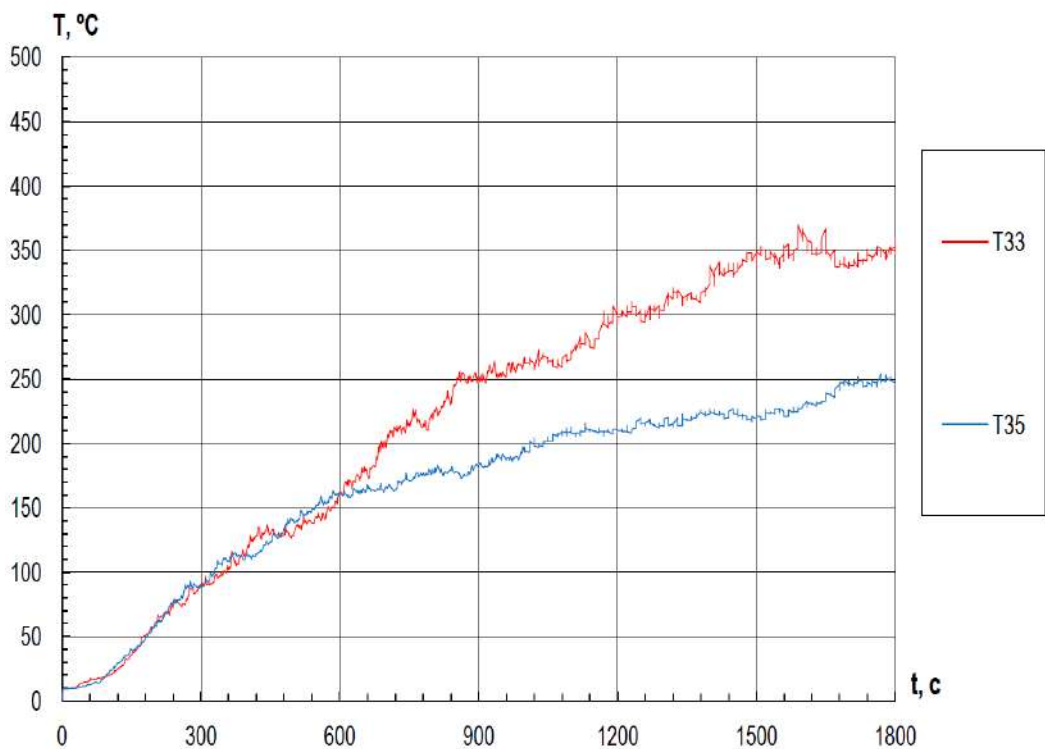


Рисунок 5.10 – Зміна температури всередині системи фасадної теплоізоляції (термопари T33-T35) за результатами FDS-моделювання

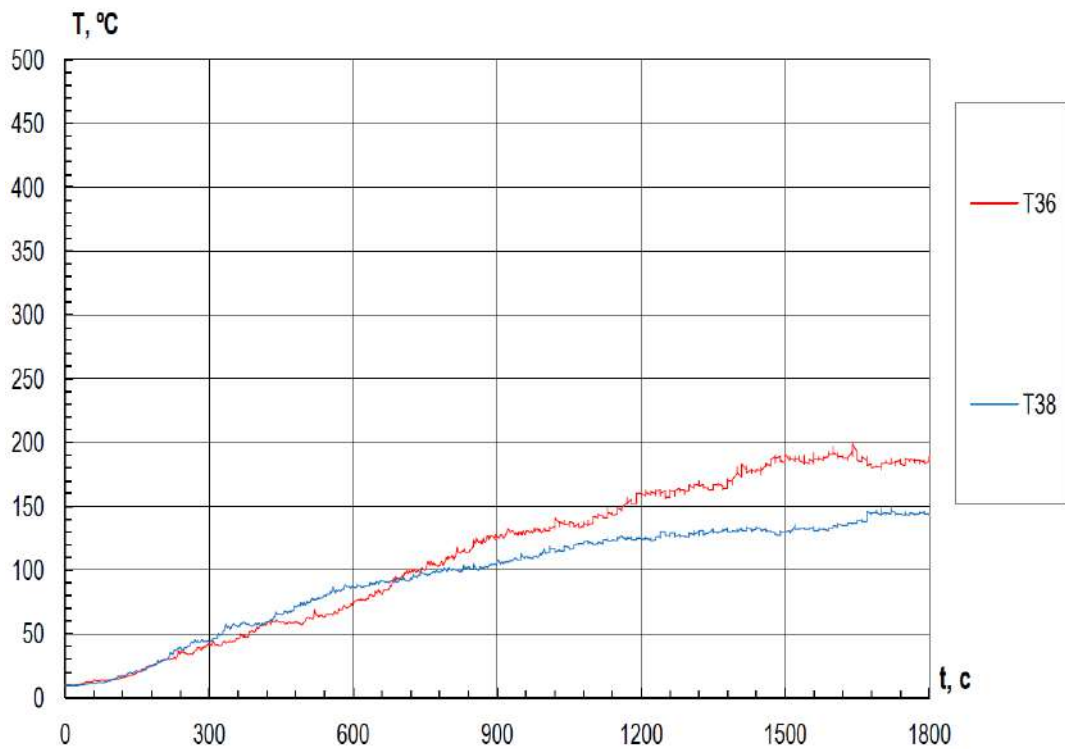


Рисунок 5.11 – Зміна температури у ТОС (термопари Т36-Т38) за результатами FDS-моделювання

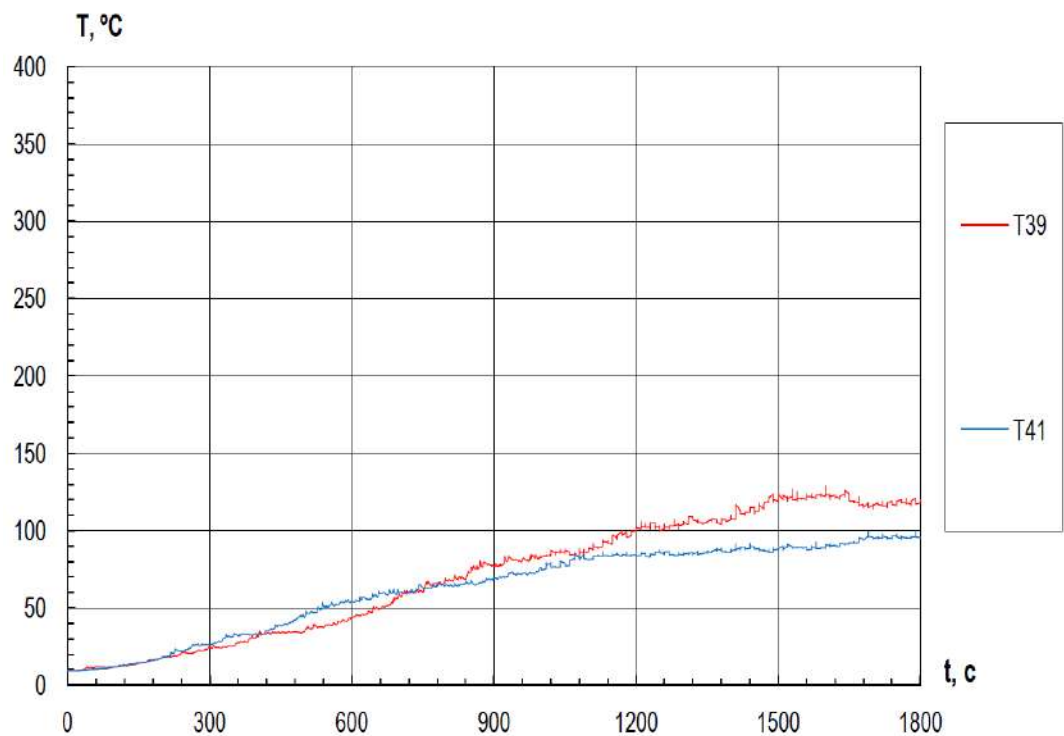


Рисунок 5.12 – Зміна температури всередині системи фасадної теплоізоляції (термопари Т39-Т41) за результатами FDS-моделювання

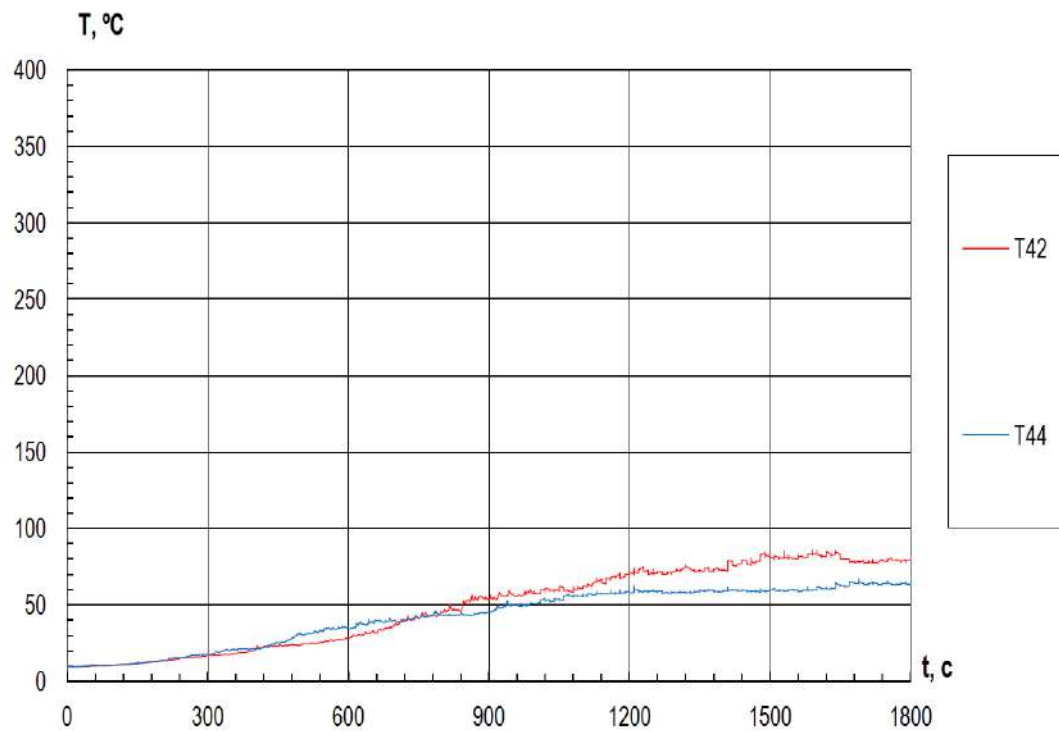
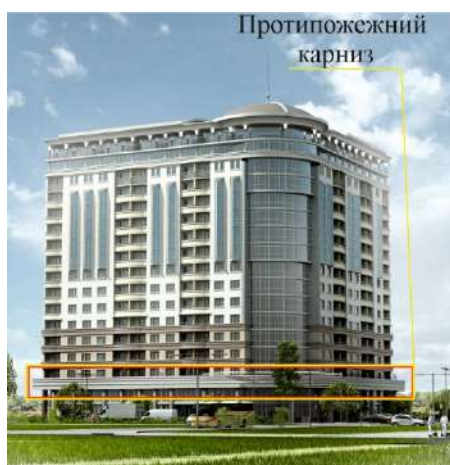


Рисунок 5.13 – Зміна температури всередині системи фасадної теплоізоляції (термопари T42-T44) за результатами FDS-моделювання

5.3 Дослідження чинників, які впливають на ефективність застосування протипожежних карнизів для запобігання поширення пожежі по фасадам будівель

Застосування протипожежних карнизів в якості фасадної протипожежної перешкоди є одним із базових заходів передбачених державними будівельними нормами ДБН В.1.1-7, ДБН В.2.2-41, ДСТУ 9192:2022, для забезпечення умов обмеження поширення пожежі по фасадам будівель, а також для виконання вимог та показників безпеки будівель і споруд, пов'язаних із їх суттєвими експлуатаційними характеристиками згідно з вимогами [131]. Слід відзначити, що застосування протипожежних карнизів можливо не тільки для висотного будівництва, але і для багатопверхових будівель та будівель підвищеної поверховості, які розділені на декілька вертикальних протипожежних відсіків. Як приклад, такі випадки притаманні для житлових, громадських та адміністративних будівель у складі яких можливо розміщення вбудованих приміщень іншого функціонального призначення (магазинів, кафе, закладів надання соціальних послуг тощо). На рис. 5.14 наведено приклад таких будівель обладнаних протипожежним карнизом, що розділяє вертикальні протипожежні відсіки.



а



б

Рисунок 5.14 – Приклади будинків обладнані протипожежними карнизами: а – житловий; б – громадський [15]

На сьогодні, єдиний метод, який регламентує встановлення протипожежного карнизу згідно будівельних норм та стандартів є розпорядчим, а саме, існує лише опис даного об'єкту нормування у будівництві (параметри конструкції, вимоги до матеріалів, тощо), що не передбачає альтернативи даного рішення. Тобто, для забезпечення вимоги щодо обмеження поширення фасадної пожежі відсутній опис критерію, який роз'яснює цілі нормативного положення.

Фактично єдиною вимогою щодо параметрів протипожежного карнизу є його ширина, що виступає за межі фасаду, а також клас вогнестійкості не менше EI 90.

Даний підхід не дозволяє оцінювати ефективність запропонованого заходу для того чи іншого типу фасаду, а також враховувати його фактичну пожежну небезпеку. Разом із тим, параметри фасадних систем та зовнішніх огорожувальних конструкцій можуть значно впливати на процеси поширення пожежі, як в частині її обмеження так і навпаки – бути причиною її швидкого поширення на вище розташовані поверхи та протипожежні відсіки [10, 76, 79].

Слід відзначити, що наукові дослідження процесів обмеження поширення пожежі ззовні по фасадам будівель [80] дали змогу розкрити взаємозв'язки поширення пожежі в залежності від параметрів світлових прорізів, а також дозволяє врахувати наявність міжповерхового віконного простінку у складі фасаду будівлі.

На рис. 5.15 наведено розрахункову схему, яка дозволяє візуалізувати процес поширення пожежі та основні параметри, які на це впливають.

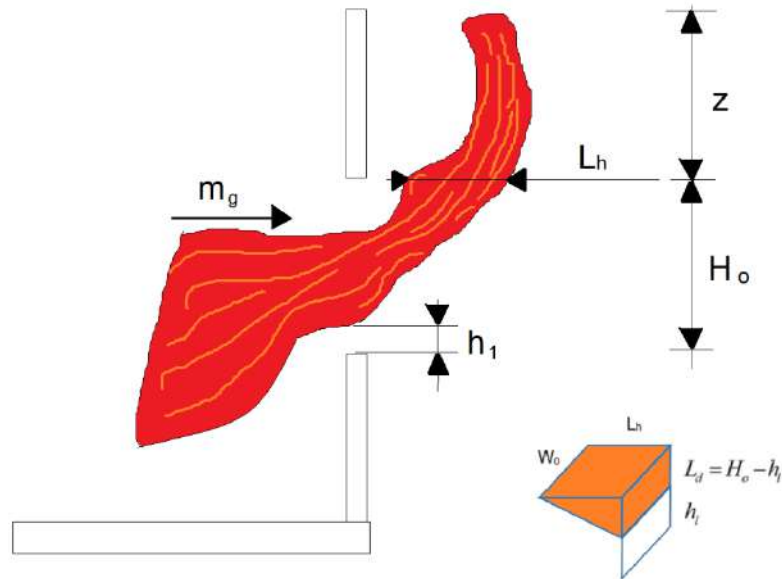


Рисунок 5.15 – Візуалізація параметрів, які впливають на поширення пожежі вверх по фасадам будівель [15]

Разом із тим, даний метод адаптований для визначення значення теплового потоку в залежності від параметрів віконних прорізів та пожежного навантаження всередині приміщення. Отримана залежність має вигляд:

$$m_g u = (\rho_\infty - \rho_g) g V = (\rho_\infty - \rho_g) g \left(\frac{L_h W_o (H_o - h_l)}{2} \right) \quad (5.1)$$

де m_g – значення теплового потоку;

u – усереднена швидкість витoku, м/с;

ρ_∞ – середнє значення густини повітря кг/м³;

ρ_g – середнє значення густини газу, кг/м³;

g – 9,81, м/с²;

V – об'єм витoku, м³;

L_h – розрахункова ширина полум'я, м;

W_o – ширина вікна, м;

H_o – висота вікна, м;

h_l – нейтральна висота площини, м [15].

В разі проведення випробувань для дослідження ефективності забезпечення обмеження поширення пожежі при використанні модельних вогнищ класу В та визначення їх необхідної площі для фасадів певної геометричної форми (висоти та ширини) слід застосовувати рівняння [15]:

$$D = \left(\frac{8W_o m_g^2 T_g^2}{\pi \rho_\infty^2 T_\infty (T_g - T_\infty) g (W_o (H_o - h_l))^2} \right) \quad (5.2)$$

Отримані математичні залежності верифіковані та апробовані за допомогою повномасштабних експериментальних досліджень для отримання залежностей зміни поширення теплового потоку по зовнішнім огорожувальним конструкціям від параметрів вікна приміщення де імітується пожежа за допомогою модельних вогнищ класу А різної потужності. Разом із тим, недоліком даних досліджень є досить обмежені дані щодо параметрів самого вікна, а саме враховується його ширина 0,94 м та 2,6 м, а також висота 1,4 м; 2,0 м; 2,7 м, що не враховує сучасні архітектурні тенденції та різноманітність проектних рішень [15].

Окремо слід відмітити роботу [81] щодо дослідження ефективності «горизонтальних виступів» за межі зовнішньої огорожувальної конструкції будівлі, які в майбутньому отримали термін протипожежні карнизи. За результатом ряду натурних випробувань Ігоря Олешкевича (Канада) отримано залежності зміни значень теплового потоку на рівні 1 м над віконним отвором (шириною 2,24 м та висотою 0,96 м), над яким встановлено протипожежний карниз із шириною виступаючої частини 0,0 м; 0,3 м; 0,6 м та 1 м. Питоме тепловиділення від модельної імітаційної пожежі становило 300 кВт/м². На основі проведених натурних випробувань було визначено, що для фасаду з протипожежним карнизом шириною 0,3 м значення теплового потоку зменшувалося в середньому на 50%, для протипожежного карнизу шириною 0,6 м – на 60%, а для протипожежного карнизу шириною 1,0 м – на 75% [15].

На рис. 5.16 наведено графіки залежності зміни відносного зменшення впливу теплового потоку при застосуванні протипожежних карнизів різної ширини.

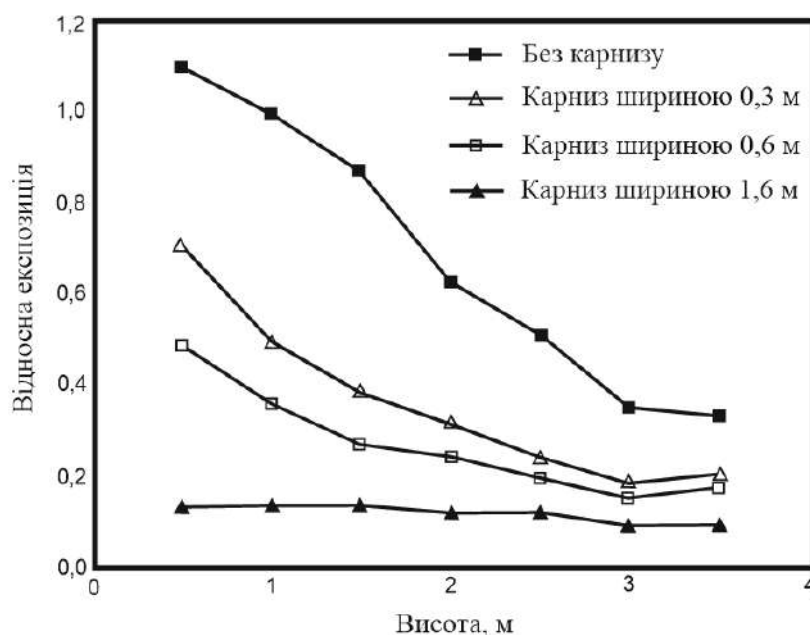


Рисунок 5.16 – Залежності відносного зменшення впливу теплового потоку при застосуванні протипожежних карнизів різної ширини [15]

Представлені залежності дозволяють наочно оцінити ефективність протипожежного карнизу, разом із цим, представлені залежності залишають невирішеним питання щодо оцінки взаємозв'язку між розміром віконного міжповерхового простінку та параметрами ширини самого карнизу. Якщо в роботі [80] за основу прийнято висоту міжповерхового простінку 1 м, що на той час в тій чи іншій мірі відповідало архітектурним тенденціям, то на сьогоднішній день розміри вікна можуть бути від стандартних 1470×1460 мм згідно з ДСТУ-Н Б В.2.6-146:2010 до суцільного заповнення склом прорізу в межах поверху, а саме від підлоги до перекриття (так звані, панорамні вікна).

На рис. 5.17 наведено схеми прикладів заповнення світлових прорізів.

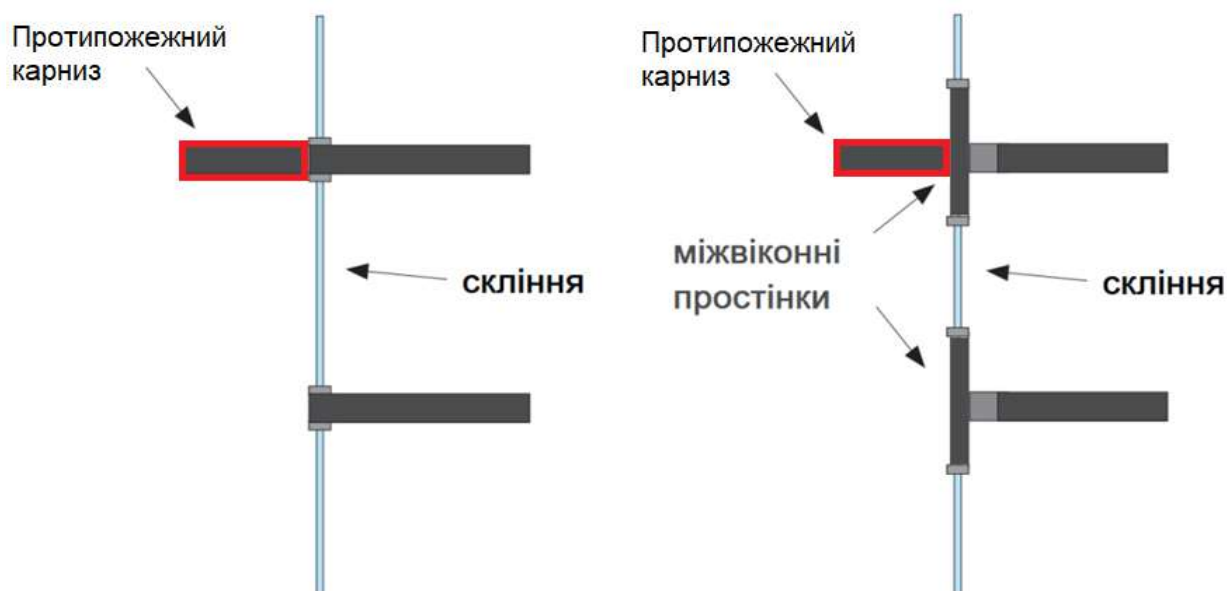


Рисунок 5.17 – Візуалізація типів заповнення світлових прорізів [15]

Тобто, на сьогоднішній день, незалежно від параметрів віконного міжповерхового простінку, розмір карнизу залишається незмінним (0,3 м або 0,75 м в залежності від умовної висоти будинку та його функціонального призначення) та приймається виключно розпорядчим методом нормування.

Окрім питання реального забезпечення обмеження поширення фасадної пожежі є питання економічної доцільності такого заходу або дослідження можливості застосування альтернативних рішень для досягнення визначеної мети.

Гіпотеза дослідження полягає в тому, що висота віконного міжповерхового простінку та ширина протипожежного карнизу може бути взаємо пов'язаними параметрами та впливати на ефективність обмеження пожежі. Таким чином постає завдання дослідити взаємозв'язки параметрів зовнішніх огорожуючих конструкцій та протипожежного карнизу на процеси обмеження поширення пожежі на вище розташований поверх будівлі [15].

Аналіз ефективності тої чи іншої вимоги будівельних норм потребує досить об'ємної роботи, а також, як правило, передбачає експериментальні

дослідження і випробування, в тому числі натурні випробування, які є досить вартісними.

Сучасні комп'ютерні програмні комплекси, зокрема FDS моделювання дозволяє проводити аналіз певних об'ємно-планувальних та конструктивних рішень за допомогою методу математичного моделювання, при цьому їх перевагою у порівнянні із натурними випробуваннями є забезпечення високої збіжності вихідних умов та забезпечення сталих параметрів їх проведення (умови навколишнього середовища, пожежне навантаження, відсутність похибки через людський фактор, параметри та точність метрологічного обладнання тощо) [129, 130]. Таким чином, вирішено за допомогою FDS моделювання дослідити взаємозв'язки параметрів зовнішніх огорожуючих конструкцій та протипожежного карнизу на процеси обмеження поширення пожежі на прикладі реальної будівлі житлового призначення, що має два протипожежні відсіки та побудувати відповідні графіки залежностей.

В якості критерію оцінки щодо забезпечення умов обмеження поширення пожежі прийнято значення температури в 250 °C, що відповідає температурі руйнування стандартної металопластикової конструкції вікна за ДСТУ EN 14351-1:2020 із товщиною скла 3 мм. Контроль температурного режиму відбуватиметься на відстані 1-2 мм від поверхні фасаду по центру поверху (1,4 м).

Тривалість моделювання для кожного досліджуваного варіанту конструктивного виконання фасаду складатиме 15 хвилин. Дана тривалість обумовлена нормативним часом прибуття пожежно-рятувальних підрозділів для міст (10 хв), а також закладається 5 хвилин на розгортання пожежно-рятувальних підрозділів та введення сил і засобів для початку ліквідації пожежі.

Під час моделювання пожежі для кожного досліджуваного варіанту конструктивного виконання фасаду визначатиметься найбільше значення

температури, яке буде зафіксоване на рівні 1,4 м фасаду поверху, який вище розташованого над поверхом де відбувається пожежа.

Під час проведення моделювання вітровий вплив не моделюється, як такий, що може створювати умови зменшення густини і однорідності теплового потоку та зменшувати висоту факелу пожежі. Також слід враховувати, що потік повітря яке має направлення в сторону будівлі, створюватиме підпір та зону підвищеного тиску, при якому холодне повітря через завихрення потраплятиме в зону прогріву фасаду і відповідно може охолоджувати стіну будівлі.

5.4 Дослідження впливу параметрів фасаду та ширини протипожежного карнизу на поширення пожежі

Під час планування експерименту досліджено параметри, які впливають на значення температури пожежі та фіксуються на рівні 1,4 м фасаду будівлі, що розташований над поверхом пожежі. До цих параметрів відносяться: значення висоти міжповерхового віконного простінку (h , м) та ширину протипожежного карнизу прямокутної форми, яка виступає за межі фасаду будівлі (b , м). На рис. 5.18 наведено візуалізацію досліджуваних параметрів.

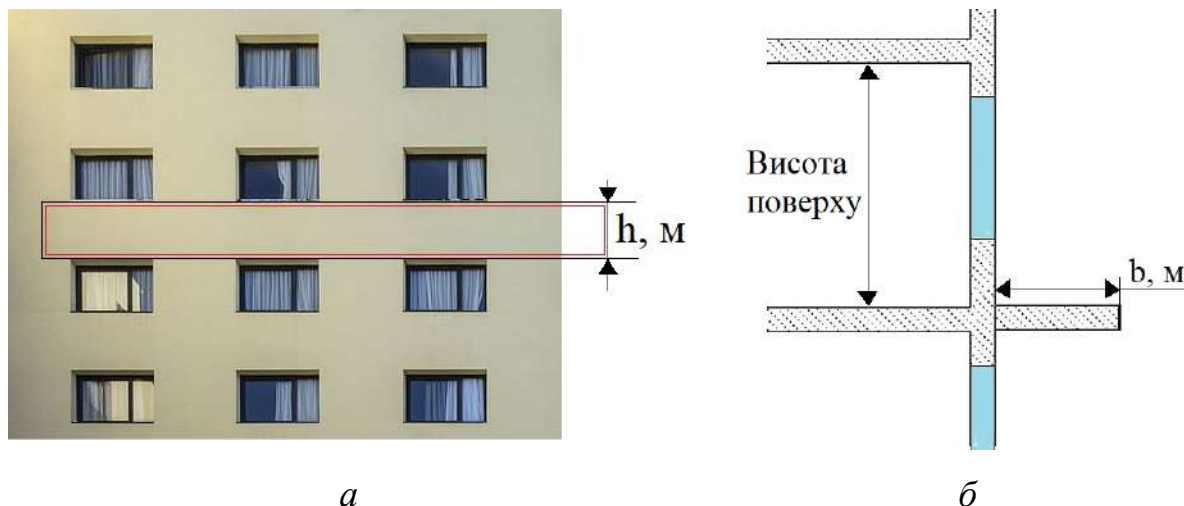


Рисунок 5.18 – Візуалізація досліджуваних параметрів: *а* – міжповерховий віконний простінок; *б* – візуалізація протипожежного карнизу [15]

Для кожного із досліджуваних параметрів, які впливають на процеси поширення пожежі по фасаду будівель визначено діапазони граничних значень, а також крок для кожного етапу розрахунку. В табл.5.1 наведено інтервали досліджуваних параметрів.

Таблиця 5.1

Інтервали параметрів в експерименті, що вибрані в якості чинників впливу [15]

Ширина протипожежного карнизу, м						Висота міжповерхових віконних простінків, м				
0,0	0,3	0,4	0,5	0,6	0,75	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
Номер експерименту						Номер експерименту				
1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5

Таким чином, суть експерименту полягала в тому, що для кожної ширини протипожежного карнизу, яка виступає за межі фасаду будівлі досліджується характер поширення пожежі в залежності від висоти міжповерхових віконних простінків. На основі отриманих даних будується графік залежності з врахуванням максимальної температури, яка була зафіксована на рівні 1,4 м фасаду поверху будівлі, що розташований над поверхом пожежі.

На першому етапі досліджень створено модель будівлі на основі обчислювальних гідродинамічних моделей тепломасопереносу, які закладені в пакеті комп'ютерної програми FDS.

Створено модель чотирьох поверхового будинку, фасад якого виконаний із негорючих матеріалів. На перших двох поверхах знаходяться приміщення магазину та офісу, тобто громадські приміщення. На третьому та четвертих поверхах знаходяться квартири. Матеріал конструкції будинку складається із цегли густиною 1900 кг/м^3 , питомою теплоємністю $2,2 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$ та теплопровідністю $1,36 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$. Монолітні бетонні конструкції з густиною 2280 кг/м^3 , питомою теплоємністю $2,04 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$ та теплопровідністю $1,35 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$. Світлові прорізи (вікна) будинку відчинені для створення найбільш несприятливих умов поширення пожежі.

Розмір кроку розрахункової сітки у моделі FDS становить 25 см^2 , що обумовлено геометричними розмірами будівельної моделі та необхідністю

забезпечення кратності розміру комірки сітки відносно геометричних параметрів протипожежного карнизу та віконних простінків міжповерхового приміщення.

За сценарієм змодельованої пожежі вона виникає на 2 поверсі в приміщенні офісу. У місці безпосереднього виникнення пожежі, полум'я та її небезпечні чинники вільно поширюються із вікон приміщення. На рівні 2 та 3 поверхів розміщено вимірювачі температури в газовому середовищі, для отримання графіків температурного режиму в зоні вікон. Фасад будинку є абсолютно вертикальним, без виступів та кутів прилягання суміжних площин фасадів. Поверхню фасадної стіни задано як анімовану поверхню з можливістю відображення її температури прогрівання.

На рис. 5.19 наведено FDS модель будинку без протипожежного карнизу та місця встановлення вимірювачів в газовому середовищі.

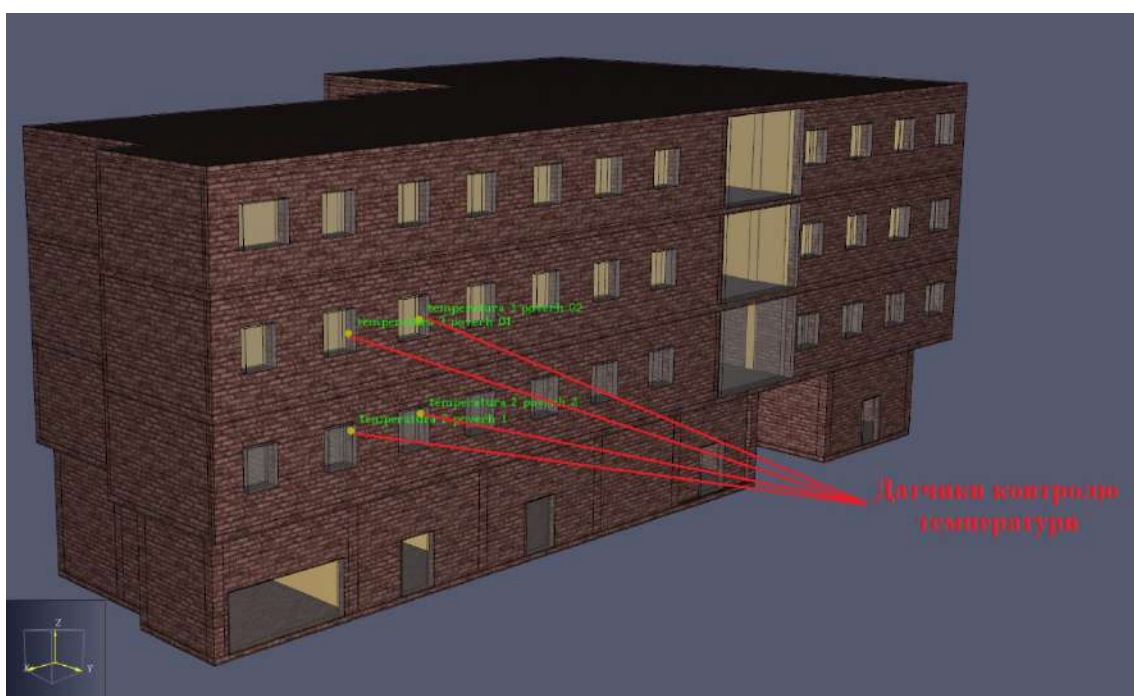


Рисунок 5.19 – Модель будинку [15]

Причиною пожежі в квартирі обрано займання електрощитової з подальшим поширенням пожежі в середині об'єму приміщення, пожежне

навантаження в середині якого складає 750 кВт/м^2 із максимальною температурою горіння 1230°C . Поширення полум'я по поверхні кімнати відбувається із швидкістю $0,025 \text{ м/с}$. Під час проведення розрахунків не враховувалась робота систем пожежогасіння або димовидалення, тобто пожежа вільно розвивалася у продовж всієї тривалості моделювання.

На першому етапі моделювання досліджувався експеримент 1–5, а саме варіант висоти міжповерхового простінку 1 м та ширини протипожежного карнизу $0,0 \text{ м}$, тобто без карнизу. Отримані дані будуть взяті за основу під час визначення фактичного захисту об'єкту від поширення фасадної пожежі.

Наступні етапи досліджень полягають у визначенні даних температури яка була зафіксована на рівні $1,4 \text{ м}$ фасаду поверху будівлі, що розташований над поверхом пожежі для всіх етапів експерименту. Отримані дані вносяться до зведеної таблиці. На рис. 5.20 наведено температурні розподіли від пожежі за результатом експерименту 1–5.

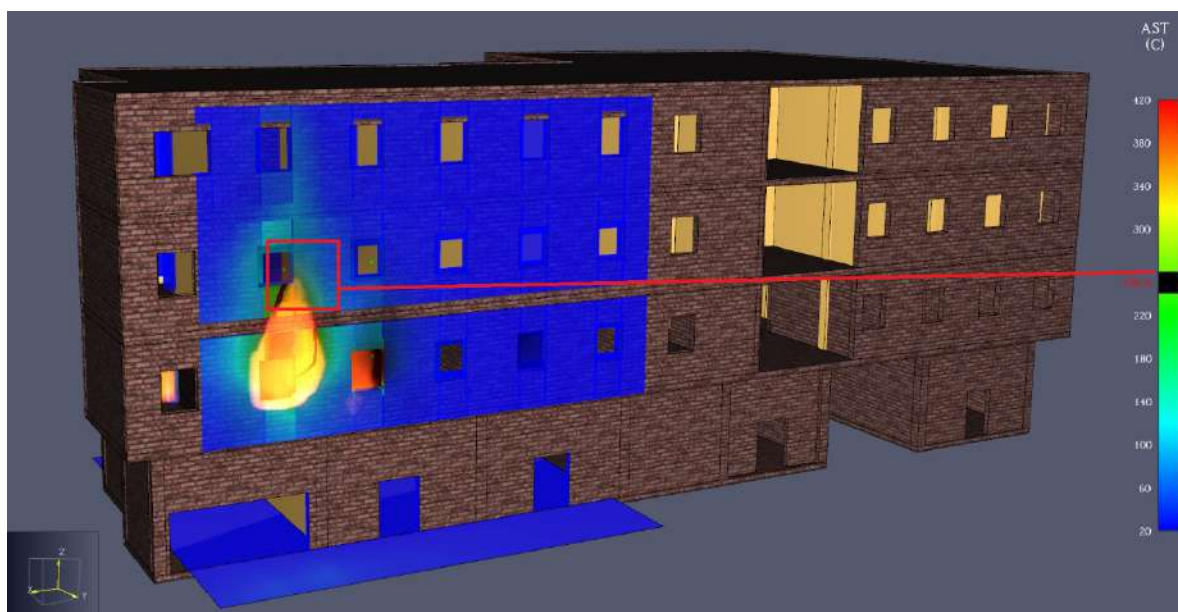


Рисунок 5.20 – Результати температурного впливу від пожежі на фасаді будівлі за сценарієм 1–5 [15]

Отримані дані свідчать, що при значенні висоти міжповерхового простінку 1,0 м та відсутності протипожежного карнизу, критичне значення температури 250°C , що відповідає температурі руйнування стандартної металопластикової конструкції вікна досягається фактично одразу. Таким чином, умови обмеження поширення пожежі із одного протипожежного відсіку в інший не забезпечено.

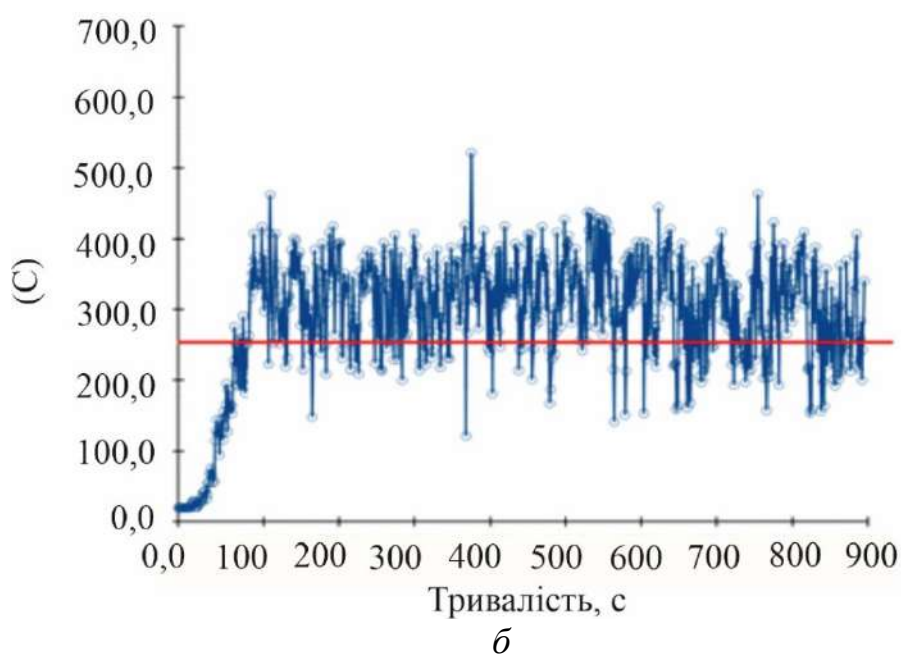
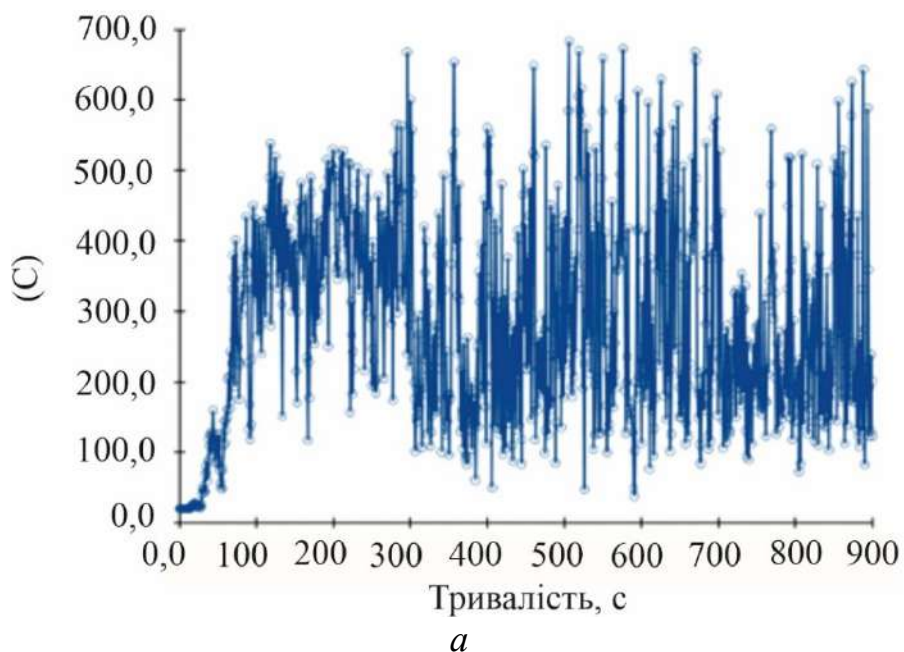


Рисунок 5.21 – Графіки температурного режиму: *а* – на рівні 2-го поверху; *б* – на рівні 3-го поверху [15]

На рис. 5.21 наведено графіки температурного режиму на рівні вікна 2-го поверху (поверх пожежі) та вище розташованого вікна 3-го поверху, при цьому червоною лінією позначено критичну межу температури.

За результатом отриманих даних встановлено, що для будинку із шириною вікна 1460 мм, висотою міжповерхового віконного простінку 1,0 м та відсутністю протипожежного карнизу умови не поширення пожежі на вище розташований поверх не виконуються. На поверхні зовнішньої огорожувальної конструкції фасаду на рівні вище розташованого поверху від впливу пожежі температура становить 435 °С. Таким чином, проведене моделювання за визначених умов для протипожежних карнизів із шириною від 0,3 м до 0,75 з кроком збільшення ширини карнизу 0,1 м згідно з планом експерименту, визначеним в табл. 5.1.

За результатом проведених досліджень отримано залежності впливу параметрів міжповерхових віконних простінків та ширини карнизу. А саме, для випадку коли висота простінку становить 1,0 м, а ширина протипожежного карнизу складає 0,75 м значення температури на рівні 1,4 м фасаду поверху будівлі, що розташований над поверхом пожежі складає 180 °С. Тобто умова безпеки у 250 °С виконується.

При цьому, критичною шириною протипожежного карнизу при наявності міжповерхового віконного простінку висотою 1,0 м є ширина 0,4 м. За даних умов, на висоті 1,4 м фасаду поверху будівлі, що розташований над поверхом пожежі фіксувалася температура до 245 °С.

На рис. 5.22 наведено візуалізацію температурних розподілів на фасаді будівлі.

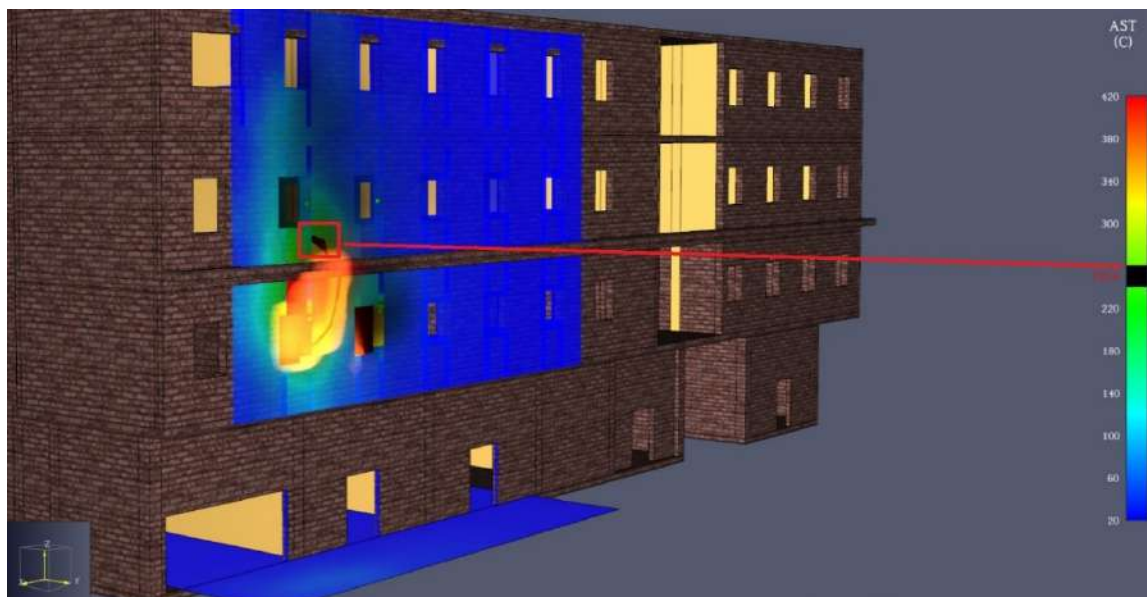


Рисунок 5.22 – Візуалізація температурних розподілів та поширення пожежі при висоті міжповерхового віконного простінку 1,0 м та ширині протипожежного карнизу 0,4 м [15]

За результатом отриманих даних побудовано графік (рис. 5.23) температурного режиму для даного випадку конструктивних параметрів фасаду на рівні 1,4 м поверху, який знаходиться над поверхом пожежі.

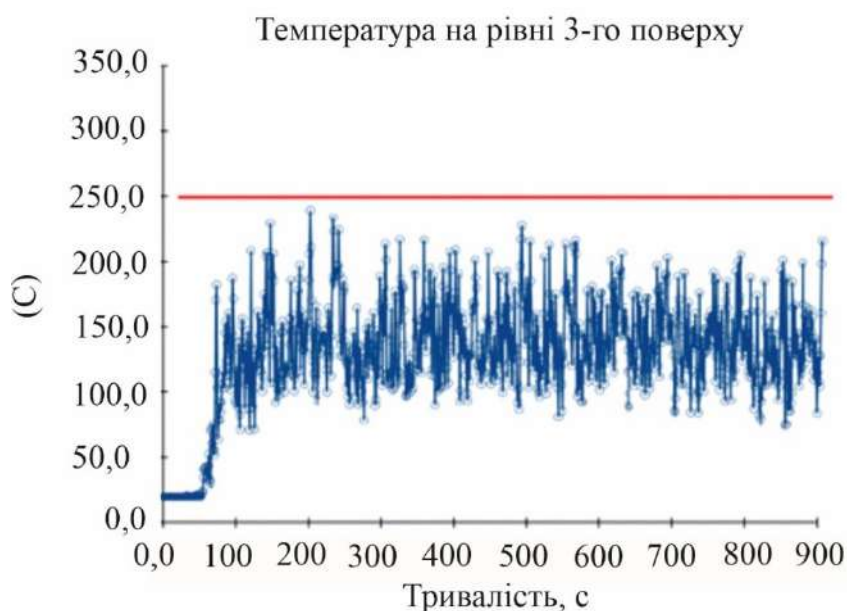


Рисунок 5.23 – Графік температурного режиму на рівні 1,4 м фасаду поверху будівлі, що розташований над поверхом пожежі при висоті міжповерхового віконного простінку 1,0 м та ширині протипожежного карнизу 0,4 м [15]

Таким чином, за даних умов моделювання критична температура 250 °С на поверхні конструкцій зовнішніх стін із фасадною теплоізоляцією не досягається.

5.5. Дослідження впливу мінімальних параметрів висоти міжповерхового віконного простінку за відсутності протипожежного карнизу

Дослідження мінімальних параметрів висоти міжповерхового віконного простінку (0,2 м) за відсутності протипожежного карнизу показали, що за даних умов поширення пожежі та її небезпечних чинників фактично ніяк не обмежується. Таким чином значення температури на рівні 1,4 м фасаду поверху будівлі, що розташований над поверхом пожежі склало 480 °С. На рис. 5.24 наведено візуалізацію температурних розподілів та поширення пожежі, а на рис. 5.25 графік температурного режиму для досліджуваної частини фасаду, при цьому червоною лінією позначена межа критичної температури.

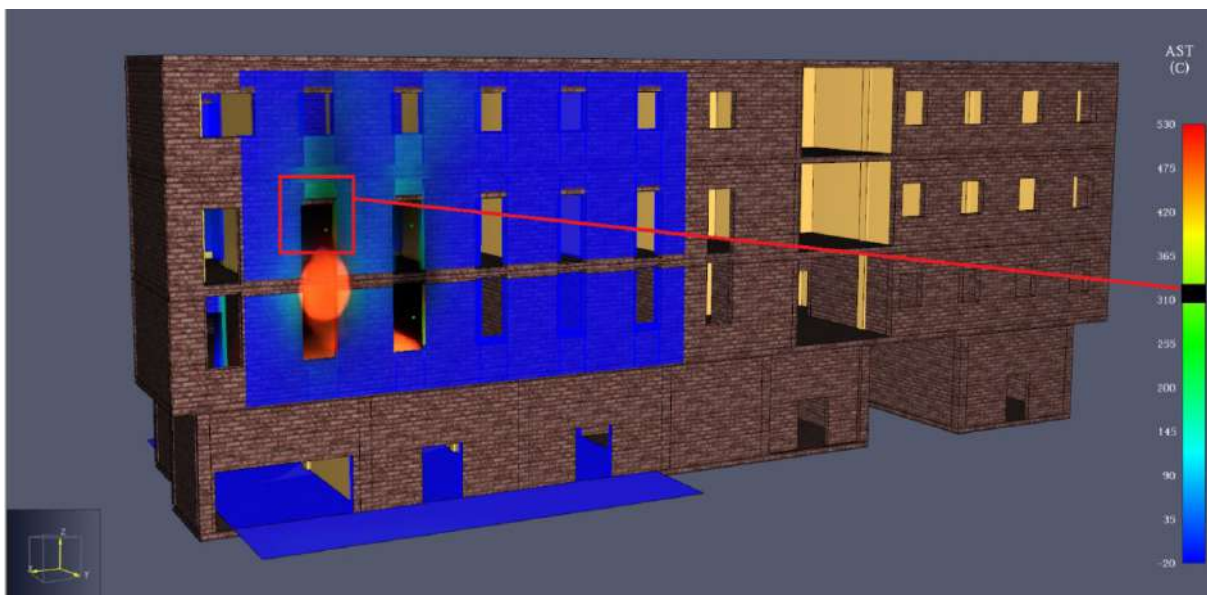


Рисунок 5.24 – Візуалізація температурних розподілів та поширення пожежі при висоті міжповерхового віконного простінку 0,2 м та ширині протипожежного карнизу 0,0 м [15]

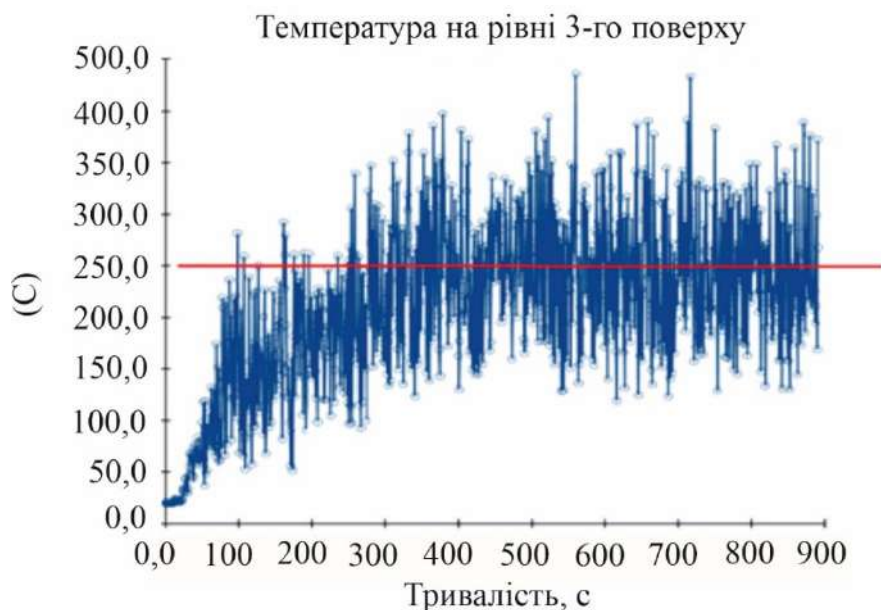


Рисунок 5.25 – Графік температурного режиму на рівні 1,4 м фасаду поверху будівлі, що розташований над поверхом пожежі при висоті міжповерхового віконного простінку 0,2 м та ширині протипожежного карнизу 0,0 м [15]

За результатом отриманих даних побудовано графік (рис. 10) температурного режиму для даного випадку конструктивних параметрів фасаду на рівні 1,4 м поверху, який знаходиться над поверхом пожежі. Результати отриманих даних показують перевищення критичної температури, а саме досягнення 480 °C на поверхні конструкцій зовнішніх стін із фасадною теплоізоляцією.

5.6. Дослідження залежності зміни температури від ширини протипожежного карнизу та висоти міжповерхового простінку

Для дослідження впливу висоти міжповерхового віконного простінку виконано моделювання за аналогічних вихідних умов пожежі. Згідно з планом експерименту, прийнято розміри протипожежних карнизів шириною від 0,3 м до 0,75 м та простінку від 0,2 м до 1,0 м з кроком збільшення висоти на 0,2 м.

За результатом даного етапу досліджень виявлено граничні умови ширини протипожежного карнизу та висоти віконних міжповерхових простінків, при яких виконується умова безпеки. Для даних умов моделювання, критичне значення ширини протипожежного карнизу склало 0,5 м та висоти міжповерхового віконного простінку 0,6 м.

Результати за даним етапом моделювання наведено на рис. 5.26, 5.27.

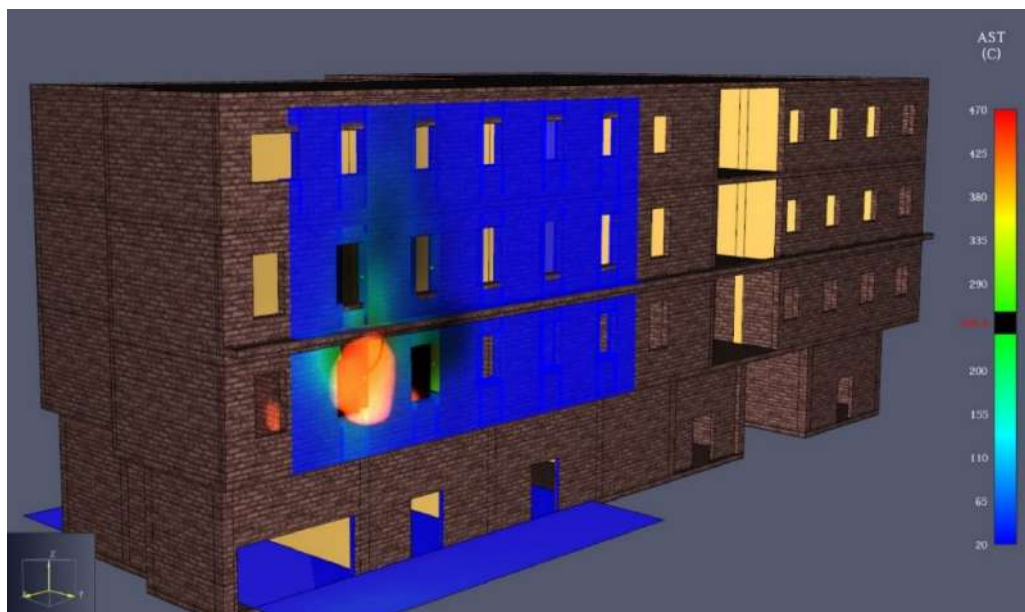


Рисунок 5.26 – Візуалізація температурних розподілів та поширення пожежі при висоті міжповерхового віконного простінку 0,6 м та ширині протипожежного карнизу 0,5 м [15]

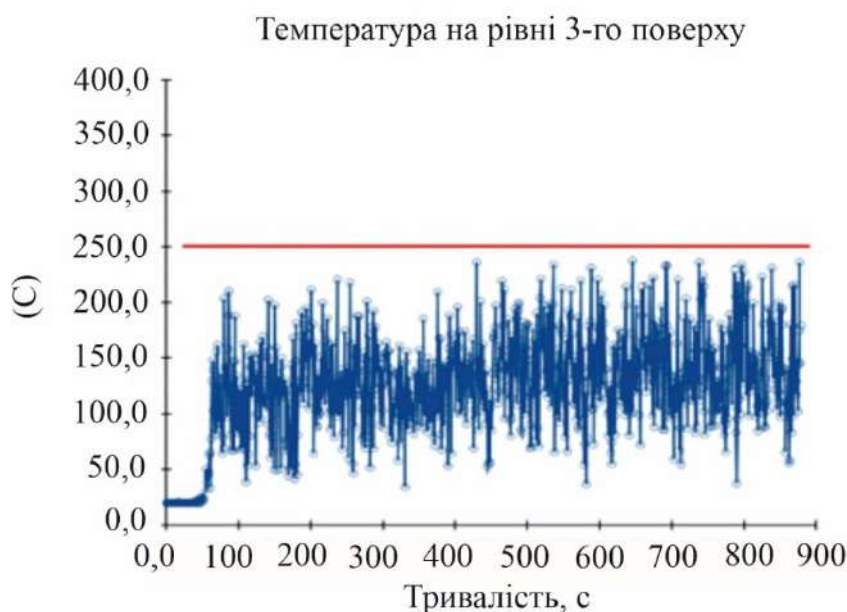


Рисунок 5.27 – Графік температурного режиму на рівні 1,4 м фасаду поверху будівлі, що розташований над поверхом пожежі при висоті міжповерхового віконного простінку 0,6 м та ширині протипожежного карнизу 0,5 м [15]

Таким чином, за результатами даного етапу моделювання виявлено залежність критерію безпеки щодо не перевищення критичної температури у $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ на рівні 1,4 м фасаду будівлі над поверхом пожежі. Він досягається при ширині протипожежного карнизу не менше 0,4 м та висоті віконного міжповерхового простінку 1,0 м, а також ширині протипожежного карнизу 0,5 м та висоті віконного простінку 0,6 м. Це дозволяє зробити висновок, що висота віконного міжповерхового простінку має менший вплив ніж ширина протипожежного карнизу, що розділяє поверх де відбувається пожежа та поверхи, які розташовані вище.

В табл. 5.2 наведено зведені дані максимального значення температури біля поверхні фасаду в залежності від ширини протипожежного карнизу та висоти віконного міжповерхового простінку. Зеленим кольором позначено умови, при яких задовольняється критерій безпеки, а саме не поширення пожежі по фасаду на вище розташований поверх.

Таблиця 5.2

Значення біля поверхні фасаду на рівні 1,4 м поверху будівлі, що розташований над поверхом пожежі в залежності від ширини протипожежного карнизу та висоти віконного міжповерхового простінку

Ширина карнизу, м	Висота віконного міжповерхового простінку, м				
	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
0,0	480	460	445	440	435
0,3	410	400	360	350	330
0,4	400	380	290	270	245
0,5	340	320	245	240	230
0,6	315	290	240	220	210
0,75	305	275	230	190	180

На рис. 5.28 наведено графіки залежностей зміни значень температури біля поверхні фасаду для кожної досліджуваної ширини протипожежного карнизу та висоти віконного міжповерхового простінку.

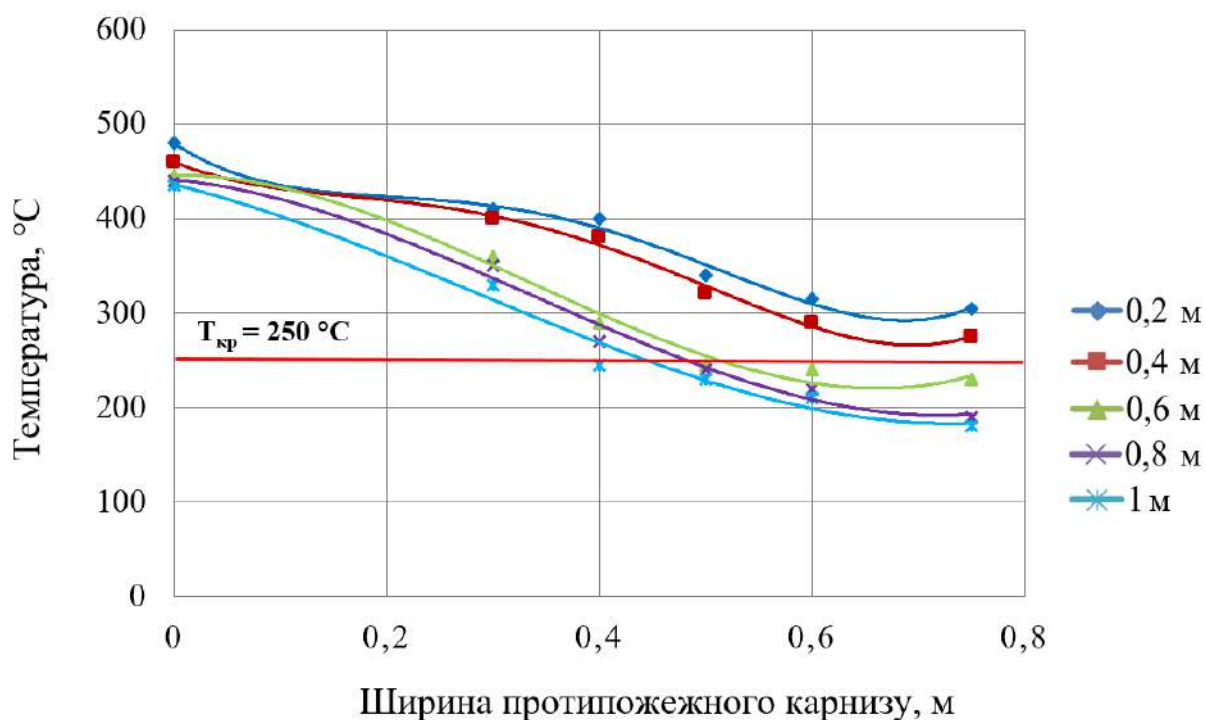


Рисунок 5.28 – Графіки залежностей зміни значень температури в залежності від ширини протипожежного карнизу та висоти віконного міжповерхового простінку [15]

Апроксимація експериментальних даних зміни значень температури описується поліноміальними залежностями y з відповідними коефіцієнтами детермінації R^2 при різній висоті віконного міжповерхового простінку:

$$0,2 \text{ м: } y=5956x^4-8610,4x^3+3790,3x^2-744,42x+479,9; R^2=0,9883;$$

$$0,4 \text{ м: } y=4550,6x^4-6116,5x^3+2306,2x^2-454,78x+459,92; R^2=0,9934;$$

$$0,6 \text{ м: } y=1590,2x^3-1592,2x^2+16,487x+445,85; R^2=0,9866;$$

$$0,8 \text{ м: } y=780,05x^3-663,08x^2-278,39x+436,18; R^2=0,9787;$$

$$1 \text{ м: } y=1150,6x^3-1171,7x^2-98,769x+441,01; R^2=0,9855.$$

Таким чином встановлено, що критичною шириною протипожежного карнизу при наявності міжповерхового віконного простінку висотою 1,0 м є ширина 0,4 м. За даних умов, на висоті 1,4 м фасаду поверху будівлі, що розташований над поверхом пожежі фіксувалася температура до 245 °С.

Отримані дані, приведені на графіках (рис. 5.28), свідчать, що при збільшенні ширини протипожежного карнизу та збільшенні висоти віконного міжповерхового простінку спостерігаються поліноміальні залежності зниження значення температури. Це можливо пояснити тим, що висота віконного міжповерхового простінку та ширина протипожежного карнизу є взаємо пов'язаними параметрами, що впливають на поширення пожежі зовнішніми вертикальними конструкціями будівель. На відміну від представлених даних [91, 92], продемонстровано, що підвищення ефективності протипожежних карнизів можливо досягти не тільки за рахунок збільшення їх ширини. Даний ефекти можливо досягти за рахунок інших параметрів зовнішніх стін, а саме висоти віконного міжповерхового простінку.

Окрім цього, графіки на рис. 5.28 та приведені температурні дані табл. 5.2 демонструють, можливість комбінованого застосування параметрів ширини протипожежного карнизу та висоти віконного міжповерхового простінку. Це дає змогу визначити найбільш ефективні планувальні рішення, при яких забезпечується обмеження поширення

пожежі на вище розташований поверх по фасаду будівлі при різних параметрах протипожежних карнизів та віконних міжповерхових простінків. Визначено, що ці умови виконуються при висоті простінку 1,0 м та ширині протипожежного карнизу 0,75 м. При цьому, значення температури на рівні 1,4 м фасаду поверху будівлі, що розташований над поверхом пожежі складає 180 °С. Тобто умова безпеки у 250 °С виконується (табл. 5.2).

Слід зауважити, що дані залежності справедливі для конструкцій зовнішніх стін із фасадною теплоізоляцією та опорядженням товстошаровою штукатуркою (фасадні системи класу А) згідно [19]. В разі застосування горючих облицювальних матеріалів в конструкції фасадних систем характер поширення пожежі та температурні режими будуть змінюватися з врахуванням теплофізичних властивостей цих матеріалів та інтенсивності їх горіння.

Висновки до розділу 5

1. За допомогою комп'ютерного моделювання було проаналізовано параметри вогневих випробувань системи фасадної теплоізоляції за допомогою середовища FDS. Це дозволило отримати як числові, так і графічні дані, які ілюструють процес виникнення, поширення та розвитку пожежі по поверхні фасадної теплоізоляції будівлі. Результати моделювання вдалося достовірно відтворити реальні умови випробувань, і порівняння експериментальних даних із чисельними розрахунками підтвердило адекватність моделі та збіжність отриманих результатів.

2. Результати чисельного моделювання вогневих випробувань у середовищі FDS свідчать про те, що загальне стандартне відхилення в теоретичних даних перевищувало ті, які були отримані у ході експериментальних досліджень. Загальні значення температур всередині вогневої камери, визначені як експериментально, так і чисельно, відрізнялися на 12-16%. Температура в віконному прорізі моделі була нижчою на 16-18%, тоді як температура біля поверхні фасадної теплоізоляції, як виявилось, була або завищеною на 10% (у випадках T16 та T20), або заниженою на 14% (T17, T21, T19). Значення температури всередині системи фасадної теплоізоляції не перевищували експериментальних даних, а відхилення середніх показників температури складало 6%.

3. Виявлено, що зміни значень температури вздовж фасаду будівлі, який знаходиться над поверхом пожежі для кожної досліджуваної ширини протипожежного карнизу та в залежності від висоти віконного міжповерхового простінку мають лінійні залежності зміни температури. Виявлено залежність, яка полягає у тому, що критерій безпеки щодо не перевищення критичної температури у 250 °C на рівні 1,4 м фасаду поверху будівлі, що розташований над поверхом пожежі досягається за умов коли ширина протипожежного карнизу становила не менше 0,4 м при висоті віконного міжповерхового простінку 1,0 м та при умові коли

ширина протипожежного карнизу становила 0,5 м при висоті віконного міжповерхового простінку 0,6 м.

4. Порівнюючи результати отриманих досліджень визначено, що висота віконного міжповерхового простінку має менший вплив ніж ширина протипожежного карнизу. Для діапазону висоти віконного міжповерхового простінку від 0,2 м до 1,0 м значення температури пожежі може зменшуватися до 35 %. В той же час, для діапазону ширини протипожежного карнизу від 0,0 м до 0,75 м значення температури може зменшуватися до 60 %.

5. Встановлено, що зміни значень температури вздовж фасаду будівлі, який знаходиться над поверхом пожежі, для кожної досліджуваної ширини протипожежного карнизу та в залежності від висоти віконного міжповерхового простінку мають поліноміальні залежності. Виявлено умови, при яких задовольняється критерій безпеки, а саме не поширення пожежі по фасаду на вище розташований поверх. Ширина протипожежного карнизу повинна бути не менше 0,4 м при висоті віконного міжповерхового простінку 1,0 м або ширина протипожежного карнизу 0,5 м при висоті віконного простінку 0,6 м.

6. Значення ефективності відведення теплового потоку від фасаду, виведення коефіцієнтів ефективності та дослідження залежностей їх ефективності від форми або їх типу протипожежного карнизу може бути предметом подальшого дослідження та може впливати на ефективність забезпечення протипожежного захисту фасадів будинків. Також на процеси поширення пожежі можуть впливати тип та значення пожежної навантаги всередині приміщення, товщина зовнішніх стін та наявність систем протипожежного захисту, якими може бути обладнана будівля.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі, яка є завершеним науковим дослідженням, наведені результати розв'язання актуального наукового завдання щодо розкриття закономірностей поширення вогню поверхнею конструкцій зовнішніх стін із фасадною теплоізоляцією на основі пінополістиролу з опорядженням штукатурками та чинників, які впливають на ефективність застосування протипожежних перешкод, як наукового підґрунтя для підвищення пожежної безпеки житлових будинків із фасадною теплоізоляцією та горючим утеплювачем.

На основі отриманих даних було сформовано такі висновки:

1. Використання зовнішніх стін із фасадною теплоізоляцією та горючим утеплювачем суттєво підвищує пожежну небезпеку. Ця небезпека залежить як від характеристик окремих матеріалів (утеплювача, опоряджувального шару), так і від конструктивних особливостей теплоізоляційної системи та будівлі в цілому. Для фасадних систем з штукатуркою значну загрозу становить швидке поширення пожежі на сусідні поверхи, тому протипожежні заходи повинні бути спрямовані на обмеження поширення вогню, запобігання обвалення горючих уламків фасаду та забезпечення швидкої та безпечної евакуації людей з будівлі до прибуття рятувальників. Нинішні вимоги пожежної безпеки не забезпечують повної безпеки фасадних систем.

2. Визначено конструктивні параметри протипожежних заходів для зовнішніх стін з фасадною теплоізоляцією та штукатуркою. Зокрема, необхідно встановлювати протипожежні пояси та обрамлення віконних і балконних прорізів для обмеження поширення вогню по фасаду. Встановлено, що периметр будівлі, а також віконні, балконні та вентиляційні прорізи слід оснащувати протипожежними поясами з мінеральної вати шириною не менше двох товщин утеплювача, причому їх облаштування може бути як горизонтальним, так і вертикальним. Також

необхідно обладнати цими поясами внутрішні кути будівлі, якщо в них є віконні та балконні прорізи.

3. В результаті проведеного аналізу вимог пожежної безпеки збірних систем фасадної теплоізоляції зовнішніх стін будинків і споруд та методів їх оцінювання встановлено, що:

- у вітчизняних будівельних нормах здатність збірних систем не поширювати вогонь по фасаду визначена як одна з основних характеристик, залежно від якої допускається улаштування конструкцій із горючою фасадною теплоізоляцією з опорядженням штукатуркою для будівель та споруд з умовною висотою більше ніж 9 м, і яка підтверджується виключно натурними вогневими випробуваннями за відповідною національною методикою;

- в країнах ЄС застосовується 12 національних методів щодо визначення здатності збірних систем не поширювати вогонь поверхню. Єдиного регіонального стандарту на метод випробування для країн-членів ЄС немає;

- підхід з оцінювання здатності збірних систем не поширювати вогонь по фасаду, що застосовується наразі в Україні, розроблений з урахуванням європейських підходів до оцінювання здатності фасадних систем поширювати вогонь по зовнішній поверхні, результатів проведених експериментальних досліджень, а також багаторічного практичного досвіду випробування таких систем.

4. За результатами натурних вогневих випробувань конструкції зовнішньої стіни із фасадною теплоізоляцією з опорядженням штукатуркою та утеплювачем з пінополістирольних плит на поширення вогню встановлено, що поширення полум'я по поверхні фасадної теплоізоляції за межі її безпосереднього контакту з полум'ям із вогневої камери не відбувалося. Максимальні значення перевищення температури в контрольних точках у шарі утеплювача (пінополістиролу) відносно початкової температури в цих точках становлять: 347°C (T34) на відмітці

2,7 м; 215°C (T37) на відмітці 3,5 м; 186°C (T40) на відмітці 4,3 м; 84°C (T43) на відмітці 5,1 м, що не перевищує граничне значення.

5. За допомогою комп'ютерного моделювання параметрів вогневого випробування фасадної теплоізоляції на поширення вогню у середовищі FDS дало числові та графічні показники, які характеризують процес виникнення, поширення і розвитку пожежі по поверхні теплоізоляції. Результати чисельного моделювання вказують на те, що загальне стандартне відхилення теоретичних даних було вищим, ніж за результатами експериментальних досліджень. Температурні значення всередині вогневої камери відрізнялися на 12-16 %, у віконному прорізі були занижені на 16-24 %, а біля поверхні системи теплоізоляції деякі значення були завищені на 22 %, інші занижені на 18 %. Температурні значення всередині системи не перевищували експериментальні дані, а відхилення середніх показників становило 16 %.

6. За допомогою комп'ютерного моделювання у середовищі FDS було досліджено параметри, які впливають на процеси поширення пожежі по фасаді будівель. Виявлено, що зміни значень температури вздовж фасаду будівлі, який знаходиться над поверхом пожежі для кожної досліджуваної ширини протипожежного карнизу та в залежності від висоти віконного міжповерхового простінку мають лінійні залежності зміни температури. Виявлено залежність критерію безпеки щодо не перевищення критичної температури у 250 °C на рівні 1,4 м фасаду поверху будівлі, який досягається за конкретних параметрів фасаду та ширини протипожежного карнизу. Встановлено, що ширина протипожежного карнизу повинна бути не менше 0,4 м при висоті віконного міжповерхового простінку 1,0 м або ширина протипожежного карнизу 0,5 м при висоті віконного простінку 0,6 м. Порівнюючи результати отриманих досліджень визначено, що висота віконного міжповерхового простінку має менший вплив ніж ширина протипожежного карнизу. Для діапазону висоти віконного міжповерхового простінку від 0,2 м до 1,0 м значення температури пожежі може

зменшуватися до 35 %. В той же час, для діапазону ширини протипожежного карнизу від 0,0 м до 0,75 м значення температури може зменшуватися до 60 %.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кузиляк В. Й., Яковчук Р. С., Веселівський Р. Б. Пожежна небезпека використання пінополістиролу як теплоізоляційного матеріалу у будівництві. Пожежна безпека. 2016. № 28. С. 81–87.
2. Яковчук Р. С., Кузик А. Д., Міллер О. В., Лин А. С. Теплоізоляційно-оздоблювальні системи фасадів будинків як фактор підвищеної пожежної небезпеки. Пожежна безпека. 2018. № 32. С. 80–89.
3. Яковчук Р. С., Кузик А. Д., Ємельяненко С. О., Скоробагатько Т. М., Івануса А. І. Аналіз протипожежних заходів у конструкціях зовнішніх стін із фасадною теплоізоляцією та опорядженням штукатуркою. Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека. 2019. № 2 (8). С. 67–73.
4. Про будівельні норми: Закон України від 17.02.2011 р. № 1704-VI. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1704-17#Text>
5. ДБН В.1.2-7-2008. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Основні вимоги до будівель і споруд. Пожежна безпека. Чинний від 2008-10-01. Вид. офіц. Київ : ДП УкрНДНЦ, 2008. 31 с.
6. The Building Regulations 2020. Volume 2. Buildings other than dwellinghouses Approved Document B (Fire safety). Ministry of Housing, Communities & Local Government and Department for Levelling Up, Housing and Communities URL: <https://www.gov.uk/government/publications/fire-safety-approved-document-b>
7. NFPA 5000: Building Construction and Safety Code, 2018. Edition URL: <https://www.nfpa.org/codes-and-standards/all-codes-and-standards/list-of-codes-and-standards/detail?code=5000>
8. Балло Я. В., Яковчук Р. С., Кагітін О. І., Стилик І. Г. (2022). Аналіз основних методів оцінювання поширення пожежі по фасадах будівель. Пожежна безпека, 41, С. 20-30. DOI: <https://doi.org/10.32447/20786662.41.2022.03>
9. Roman Yakovchuk, Andriy Kuzyk, Olexander Kagitin, Andriy Ivanusa and Sergiy Yemelyanenko (2021). FDS simulation of fire spreading on façade heat

insulating system. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 635 (2021) 012009. Режим доступу: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/635/1/012009/pdf>

10. Р.С. Яковчук, Я.В. Балло, А.Д. Кузик, О.І. Кагітін, В.М. Ковальчук (2021). FDS моделювання ефективності протипожежних карнизів на запобігання поширенню пожежі фасадними конструкціями висотних будівель. Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності, 23, 39-45
<https://doi.org/https://doi.org/10.32447/20784643.23.2021.06>

11. Яковчук Р. С., Кагітін О. І., Лоїк В. Б., Синельников О. Д., Галанченко Р. Р., Возняк О. О. (2021). Аналіз чинників, які впливають на поширення вогню конструкцією фасадної теплоізоляції з вентильованим повітряним прошарком. Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності, 24, 57-65.
<https://doi.org/10.32447/20784643.24.2021.07>

12. Я. В. Балло, Р. С. Яковчук, В. В. Ніжник, О. І. Кагітін (2022). Аналіз та систематизація типів фасадних систем будівель як передумова удосконалення протипожежних заходів. Пожежна безпека, 40, 5-15.
<https://doi.org/https://doi.org/10.32447/20786662.40.2022.01>

13. Кагітін О. І., Веселівський Р. Б. (2023). Обґрунтування процедури проведення випробувань збірних систем фасадної теплоізоляції на поширення вогню. Пожежна безпека, 43, 63-75.
<https://doi.org/10.32447/20786662.43.2023.08>

14. Ballo, Y., Nizhnyk, V., Veselivsky, R., Kagitin, O. (2023). Influence of the facade slope on fire propagation processes on higher floors. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 5(10(125), 43–52.
<http://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.288174>

15. Kagitin, O., Veselivskyi, R., Havrys, A., Ballo, Y., Yakovchuk, R., Kovalyshyn, B. (2024). Determining the influence of facade parameters and the width of a fire-proof eaves on preventing the spread of fire through external

vertical structures of buildings. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4 (1 (130)), 6–16. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.303640>

16. ДБН В.2.6-31:2016 Теплова ізоляція будівель / Державне підприємство «Укрархбудінформ». К.: ДП «Укрархбудінформ», 2017. 33 с.

17. ДБН В.1.2-11-2008 Основні вимоги до будівель і споруд. Економія енергії / Держбуд України. К.: Держбуд України, 2008. 14 с.

18. Про енергетичну ефективність будівель: Закон України від 22.06.2017 № 2118-VIII. Відомості Верховної Ради (ВВР). 2017. № 33. Ст. 359.

19. Конструкції зовнішніх стін із фасадною теплоізоляцією. Вимоги до проектування: ДБН В.2.6-33:2018 [Чинні від 2018-12-01]. К.: Мінрегіон України від 02.08.2018 № 199. 2018. 18 с. (Державні будівельні норми України).

20. Захист від пожежі. Пожежна безпека об'єктів будівництва: ДБН В.1.1.7-2016. [Чинні від 2017-06-01]. К.: Мінрегіон України від 31.10.2016 № 287. 2017. 41 с. (Державні будівельні норми України).

21. Будинки і споруди. Житлові будинки. Основні положення: ДБН В.2.2-15:2019 [Чинні від 2019-12-01]. К.: Мінрегіон України від 26.03.2019 № 178. 2018. 76 с. (Державні будівельні норми України).

22. Будинки і споруди. Громадські будинки та споруди. Основні положення: ДБН В.2.2-9:2018 [Чинні від 2019-06-01]. К.: Мінрегіон України від 26.03.2019 № 260. 2018. 49 с. (Державні будівельні норми України).

23. Мала гірнича енциклопедія: у 3 т. / за ред. В. С. Білецького. Д.: Східний видавничий дім, 2013. Т. 3: С - Я. 644 с.

24. Дагіль В. Г. Пожежна безпека термомодернізації будівель за допомогою фасадних систем. Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил. 2014. № 4. С. 118-120.

25. Лівінський О.М. Довідник будівельника. Київ: Мислене древо. 2010. 504 с.

26. Звіт про науково-дослідну роботу «Об-ґрунтування умов і процедури натурних вогневих випробувань теплоізоляційно-оздоблювальних систем зовнішніх стін будинків і споруд на поширення вогню («Фасади – натурні випробування»))» (№ держреєстрації 0119U102437). Київ, ІДУ НД ЦЗ. 2020. 229 с.

27. Сенченко І. О. Спайдерне скління фасадів - види конструкцій. Будівельні технології. URL: https://viknotex.at.ua/news/spajderni_fasadi/2010-04-22-6

28. Радіусні фасади - особливості застосування облицювальних матеріалів. Фасадні системи та технології. URL: <https://facady.com/radiusnye-fasady-osobennosti-primeneniya-oblicovochnyh-materialov>.

29. Cao L. What are Kinetic Facades in Architecture? ArchDaily. URL: <https://www.archdaily.com/922930/what-are-kinetic-facades-in-architecture>.

30. The risks associated with falling parts of glazed facades in case of fire / Bartłomiej Sędlak et al. Open Engineering. 2018. Vol. 8, no. 1. P. 147–155.

31. Яковчук Р., Кузик А., Ємельяненко С. і Скоробагатько Т. Механізм поширення пожежі поверхнею конструкцій зовнішніх стін із фасадною теплоізоляцією з горючим утеплювачем та опорядженням штукатуркою. Пожежна безпека. 2019. №34. С. 96-103. <https://doi.org/10.32447/20786662.34.2019.16>

32. World Fire Statistics. Report № 25. URL: https://www.ctif.org/sites/default/files/news_files/2020-06/CTIF_Report25.pdf

33. Скоробагатько Т., Добростан О., Новак С. (2020). Аналіз європейських методів оцінювання стійкості збірних систем фасадної теплоізоляції до поширення вогню. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*, (1(9)), 94–106. <https://doi.org/10.33269/nvcz.2020.1.94-106>

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

35. Климась Р. Статистика пожеж та їх наслідків в Україні у збірниках аналітичних матеріалів / Климась Р., Одинець А., Матвійчук Д., Несенюк Л. / Статистичний збірник аналітичних матеріалів // УкрНДІЦЗ, Київ 2018, 100 с.

36. Одинець А.В., Балло Я.В., Голікова С.Ю., Несенюк Л.П. (2020). Аналіз стану з пожежами у висотних будинках в Україні. Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека. № 2 (10). С. 91-102.
<https://doi.org/10.33269/nvcz.2020.2.91-102>

37. Brushlinsky N.N., Ahrens Marty, Sokolov S.V., Wagner Peter. World Fire Statistics. Report No 22. International Association of Fire and Rescue Services (CTIF): Copyright by Center of Fire Statistics of CTIF, 2017. 56 p.

38. Fire Spread Caused by Combustible Facades in Japan. *Fire Technology*. Volume 52, Issue 4, 1 July 2016, Pages 1081-1106. URL :
<https://doi.org/10.1007/s10694-015-0535-5>

39. Hou, Yanan & Cheng, Xudong & Liu, Shenyong & Liu, Changcheng & Zhang, Heping. (2015). Experimental Study on upward Flame Spread of Exterior Wall Thermal Insulation Materials. *Energy Procedia*. 66. 161-164.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.02.085>

40. Балло Я.В., Яковчук Р.С., Ніжник В.В., Сізіков О.О., Кузик А.Д. (2020). Дослідження конструктивних параметрів протипожежних карнизів для запобігання поширенню пожежі фасадними конструкціями висотних будинків. Пожежна безпека. № 37. С. 16-23.
<https://doi.org/10.32447/20786662.37.2020.03>

41. Новак С.В., Нефедченко Л.Н., Коваленко В.В. Нормативное обеспечение определения пожарной опасности внешних стен с фасадной теплоизоляцией. Науковий вісник УкрНДІПБ. 2013. № 2 (28). С. 39-45.

42. Jensen, G. (2013). Fire spread modes and performance of fire stops in vented façade constructions – overview and standardization of test methods. *MATEC Web of Conferences*, 9, 02002, 1st International Seminar for Fire Safety of Facades. Paris, France, November 14–15, 2013.
<https://doi.org/10.1051/matecconf/20130902002>

43. ASTM E2912-17 Standard Test Method for Fire Test of Non-Mechanical Fire Dampers Used in Vented Construction, ASTM International, West Conshohock-en, PA, 2017, doi: 10.1520/E2912-17.

44. Suáreza, M., Sanjuanb, C., Gutiérreza, A., Pis-tonoa, J., Blancoa, E. (2012). Energy evaluation of an horizontal open joint ventilated façade. *Applied Thermal Engineering*, Volume 37, 302-313.

45. Kozioł, S., Zbrowski, A. (2012). The method for increasing the safety of the buildings by application of heat recuperation in the fighting ventilation systems. *Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza*, T. 27, 39-45.

46. Yanan Hou, Xudong Cheng, Shenyong Liu, Changcheng Liu, Heping Zhang. (2015). Experimental Study on upward Flame Spread of Exterior Wall Thermal Insulation Materials, *Energy Procedia*, Volume 66, 161-164, ISSN 1876-6102.

47. Kumm, M., Söderström, J. and A. Lönnermark. (2013). EPS insulated façade fires from a fire and rescue perspective, 1st International Seminar for Fire Safety of Facades, Paris (France).

48. Zhang, G., Zhu, G., Zhao, G. (2016). Analysis of the Influence of Construction Insulation Systems on Public Safety in China. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 13, 861.

49. Климась Р.В., Одинець А.А. Статистика пожеж та їх наслідків в Україні за 2021 рік: Звіт аналітичних матеріалів. К.: ІДУ НД ЦЗ, 2021. 60 с.

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

51. Obwieszczenieministra Inwestycji I Rozwoju1 w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu rozporządzenia Ministra Infrastruktury w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie. z dnia 8 kwietnia 2019 r. Warszawa. 112 p.

52. OIB - Richtlinien (OIB-330-001/19). Österreichisches Institut für Bautechnik. Begriffsbestimmungen. Ausgabe: April 2019. Austria. 13 p. 6.

53. Marija Jelčić Rukavina, Milan Carević, Ivana Banjad Pečur. Fire protection of façades. The Guidelines for Designers, Architects, Engineers and Fire Experts. University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering Zagreb, Croatia. 2017. 64 p.

54. K. Kordina, C. Meyer-Ottens, Holz Brand-schutz Handbuch. (1995). Deutsche Gesellschaft für Holzforschung e.V. (Hrsg.): Ernst & Sohn Verlag.

55. J. Mayr, L. Battran. (2014). Handbuch Brandschutzatlas Grundlagen – Planung – Ausführung. FeuerTrutz.

56. ДСТУ 8829:2019 Пожежовибухонебезпечність речовин і матеріалів. Номенклатура показників і методи їхнього визначення. Класифікація.

57. ДБН В.2.2-3:2018 Заклади освіти.

58. ДБН В.2.2-4:2018 Заклади дошкільної освіти.

59. ДБН В.2.2-10:2022 Заклади охорони здоров'я. Основні положення.

60. ДБН В.2.2-40:2018 Інклюзивність будівель і споруд. Основні положення. Із Зміною № 1.

61. ДБН В.2.2-18:2007 Заклади соціального захисту населення.

62. ДБН 363-92 Державні будівельні норми. Житлові будинки для осіб похилого віку сільської місцевості України.

63. ДСТУ Б В.2.6-34:2008 Конструкції будинків і споруд. Конструкції зовнішніх стін із фасадною теплоізоляцією. Класифікація і загальні технічні вимоги.

64. ДСТУ Б В.2.6-35:2008 Конструкції будинків і споруд. Конструкції зовнішніх стін із фасадною теплоізоляцією та опорядженням індустриальними елементами з вентильованим повітряним прошарком. Загальні технічні умови.

65. ДСТУ Б В.2.6-36:2008 Конструкції будинків і споруд. Конструкції зовнішніх стін із фасадною теплоізоляцією та опорядженням штукатурками. Загальні технічні умови.

66. ДСТУ Б В.1.1-2-97 Матеріали будівельні. Метод випробування на займистість.

67. ДСТУ EN ISO 1716:2023 Випробування будівельних виробів щодо реакції на вогонь. Визначення вищої теплоти згоряння (теплотворної здатності) (EN ISO 1716:2018, IDT; ISO 1716:2018, IDT).

68. ДСТУ EN ISO 1182:2022 Випробування будівельних виробів щодо реакції на вогонь. Випробування на негорючість (EN ISO 1182:2020, IDT; ISO 1182:2020, IDT).

69. Методика натурних вогневих випробувань теплоізоляційно-оздоблювальних систем зовнішніх стін будинків і споруд на поширення вогню. К.: УкрНДПБ МНС України, 1999, 2010. 18 с.

70. ДСТУ Б В.1.1-4-98* Захист від пожежі. Будівельні конструкції. Методи випробувань на вогнестійкість. Загальні вимоги. [Чинний від 1999-03-01]. К.: Державний комітет будівництва, 1998. 47 с.

71. ДСТУ Б В.1.1-21:2009 Захист від пожежі. Конструкції зовнішніх стін із фасадною теплоізоляцією. Метод великомасштабних вогневих випробувань (ISO 13785-2:2002, MOD).

72. ДСТУ Б В.1.1-22:2009 Захист від пожежі. Конструкції зовнішніх стін із фасадною теплоізоляцією. Метод середньомасштабних вогневих випробувань (ISO 13785-1:2002, MOD).

73. Технічний регламент будівельних виробів, будівель і споруд. Затв. постановою Кабінету Міністрів України від 20 грудня 2006 року № 1764.

74. ДСТУ-Н Б ETAG 017:2013 Настанова з європейського технічного ухвалення комплектів ізоляції. Збірні системи для зовнішньої ізоляції стін (ETAG 017:2005, IDT).

75. ДБН В.2.5-56:2014 Системи протипожежного захисту. Вид. офіц. Київ: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України. 2015. 133 с.

76. Hietaniemi J, Hostikka S, Vaari J (2004) FDS simulation of fire spread & comparison of model results with experimental data. Available: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/workingpapers/2004/W4.pdf>. Accessed 2014 Dec. 8.

77. ISO 5660-1:2015 Reaction-to-fire tests – Heat release, smoke production and mass loss rate. Part 1: Heat release rate (cone calorimeter method) and smoke production rate (dynamic measurement).

78. ISO 9705-1:2016 Reaction to fire tests – Room corner test for wall and ceiling lining products. Part 1: Test method for a small room configuration.

79. Yakovchuk R., Kuzyk A., Skorobagatko T., Yemelyanenko S., Borys O., Dobrostan O. (2020). Computer simulation of fire test parameters façade heat insulating system for fire spread in fire dynamics simulator (FDS). *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of geology and technology sciences*. Volume 4, Number 442 (2020), pp. 35 – 44.
<https://doi.org/10.32014/2020.2518-170X.82>

80. R. Jansson, and J. Anderson., “Experimental and Numerical Investigation of Fire Dynamics in a Facade Test” Rig. In Proceedings of Fire Computer Modeling, pp.247. Santander, Spain. Oct. 2012.

81. Anderson, J., Jansson, R., “Fire Dynamics in Façade Fire Tests: Measurement and Modeling”, Proceedings of Interflam 2013, page 93, Royal Holloway College, University of London UK, (2013).

82. Anderson, J. and Jansson, R., “Façade fire tests – measurements and modeling”, MATEC Web of Conferences 9, 02003 (2013).

83. Anderson, J., Boström, L., Jansson, R., Milovanović, B., “Fire dynamics in façade fire tests: Measurement, modeling and repeatability”, Applications of Structural Fire Engineering, 15-16 October 2015, DOI:
<https://doi.org/10.14311/asfe.2015.059>

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

85. BS 8414-1:2015 Fire performance of external cladding systems. Test method for non-loadbearing external cladding systems applied to the masonry face of a building. BSI, 2015. 20 p.

86. V. Dréan, R. Schillinger, G. Auguin “Fire exposed facades: Numerical modelling of the LEPiR2 testing facility” MATEC Web of Conferences 46 03001 (2016) DOI: 10.1051/matecconf/20164603001.

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

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

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

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

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

92. Oleszkiewicz, I. (1989). Heat transfer from a window fire plume to a building facade. *ASME HTD – Collected Papers in Heat Transfer*, 123, 163–170.

93. Oleszkiewicz, I. (1991). Vertical separation of windows using spandrel walls and horizontal projections. *Fire Technology*, 27(4), 334–340.

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

95. Development of a European approach to assess the fire performance of facades: Lars Boström, Anja Hofmann-Böllinghaus, Sarah Colwell, Roman Chiva, Péter Tóth, Istvan Moder, Johan Sjöström, Johan Anderson, David Lange. European Commission B-1049 Brussels. June 2018. doi:10.2873/954759.

96. Simion, A., Anghel, I., Dragne, H., Stoica, D. (2019). Contributions on the fire performance assessment of ETICS systems. *IOP Conference Series*:

Materials Science and Engineering, Volume 572, Issue 1, 2 August 2019, Article number 012112. URL : <https://doi:10.1088/1757-899X/572/1/012112>

97. Simion, A., Dragne, H (2017). Testing Method for External Cladding Systems - Incerc Romania. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* Volume 209, Issue 1, 27 June 2017, Article number 012102. URL : <https://doi:10.1088/1757-899X/209/1/012102>

98. Tamim A, Stolen R. Fire Containment By Vent Opening Protectives In The Open State. *Proceedings Interflam 2010*, p. 1783-1792.

99. Ibanez-Puy M, Vidaurre-Arbizu M, Sacristan-Fernandez JA, Martin-Gomez C. Opaque ventilated facades: thermal and energy performance review. *Renew Sustain Energy Rev.* 2017; 79: 180-191. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.059>.

100. Livkiss K, Svensson S, Husted B, van Hees P. Flame heights and heat transfer in facade system ventilation cavities. *Fire Technol.* 2018; 54: 689-719. <https://doi.org/10.1007/s10694-018-0706-2>.

101. Bikas D, Tsikaloudaki K, Kontoleon KJ, Giarma C, Tsoka S, Tsigoti D. Ventilated facades: requirements and specifications across Europe. *Procedia Environ Sci.* 2017; 38: 148-154. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2017.03.096>.

102. Lalu O, Anghel I, Serban M, Mocioi I, Branisteanu B. Experimental researches on determining the fire action response of improved exterior cladding systems provided with incombustible barriers. *Energy Procedia.* 2017; 112: 287-295. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.1099>.

103. Kolaitis DI. Chapter 8: Safety aspects of Façade fires: novel risks and challenges posed by high rise buildings. In: M Chalaris, D Emmanouloudis, JC Wen, ZP Wu, eds. *Novel Approaches in Risk, Crisis and Disaster Management*. New York, NY: Nova Science; 2018: 305-320 ISBN: 978-1-53613-240-3.

104. Asimakopoulou E, Kolaitis D, Founti M. Thermal characteristics of externally venting flames and their effect on the exposed façade surface. *Fire Safety J.* 2017; 91: 451-460. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.03.075>.

105. Jeffs GMF, Klingelhofer HG, Prager FH, Rosteck H. Fire-performance of a ventilated façade insulated with a B2-classified rigid polyurethane foam. *Fire Mater.* 1986; 10: 78-89.
<https://doi.org/10.1002/fam.810100206>.
106. Asimakopoulou E, Chotzoglou K, Kolaitis D, Founti M. Characteristics of externally venting flames and their effect on the façade: a detailed experimental study. *Fire Technol.* 2016; 52: 2043-2069.
<https://doi.org/10.1007/s10694-016-0575-5>.
107. Hurley M, Gottuk D, Hall J, et al. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. 4th ed. Quincy, MA: National Fire Protection Association; 2016.
108. Fang X, Ren F, Zhang X, Sun X, Yang Y, Hu L. Façade flame height ejected from opening of a compartment under the coupling effect of side walls and ambient wind. *Fire Saf J.* 2020; 112:102966.
<https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2020.102966>.
109. Giraldo PM, Lacasta A, Avellaneda J, Burgos C. Computer simulation on fire behaviour in the ventilated cavity of ventilated façade systems. *MATEC Web Conf.* 2013; 9:03002.
<https://doi.org/10.1051/mateconf/20130903002>.
110. EN 13501-1:2018 Fire classification of construction products and building elements - Part 1: Classification using data from reaction to fire tests. Brussels: European Committee for Standardization, 2018. 58 p.
111. EN 13501-2:2016 Fire classification of construction products and building elements - Part 2: Classification using data from fire resistance tests, excluding ventilation services. Brussels: European Committee for Standardization, 2016. 84 p.
112. PN-B-02867:2013 Ochrona przeciwpożarowa budynków - Metoda badania stopnia rozprzestrzeniania ognia przez ściany zewnętrzne od strony zewnętrznej oraz zasady klasyfikacji. PKN, 2013. 20 s.

113. BS 8414-2:2015 Fire performance of external cladding systems. Test method for non-loadbearing external cladding systems fixed to and supported by a structural steel frame. BSI, 2015. 22 p.
114. DIN 4102-20:2017 Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen - Teil 20: Ergänzender Nachweis für die Beurteilung des Brandverhaltens von Außenwandbekleidungen. - GIS, 2017. 25 h.
115. ÖNORM B 3800-5:2013 Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen – Teil 5: Brandverhalten von Fassaden - Anforderungen, Prüfungen und Beurteilungen. Austrian Standards plus, 2013. 14 s.
116. Prüfbestimmung für Aussenwandbekleidungssysteme. VKF/AEAI/AICAA, 2015. 11 s.
117. Technical regulation A 2.2.1.5. Germany, 2015.
118. LEPiR 2-2010 Facade fire propagation test. France, 2010.
119. MCZ 14800-6:2009 Tűzállósági vizsgálatok. 6. rész: Tűzterjedés vizsgálata épülethomlokzaton. MTS, 2009. 9 o.
120. Engineering guidance 16. Finland.
121. ISO 13785-2:2002 Reaction-to-fire tests for façades - Part 2: Large-scale test. Geneva: International Organization for Standardization, 2002. 16 p.
122. ISO 13785-1:2002 Reaction-to-fire tests for façades - Part 1: Intermediate-scale test. Geneva: International Organization for Standardization, 2002. 10 p.
123. Fire Hazards of Exterior Wall Assemblies Containing Combustible Components, N. White and M. Delichatsios, Springer 2015.
124. ДСТУ 9072:2021 Конструкції зовнішніх стін із фасадною теплоізоляцією. Метод натурних вогневих випробувань збірних систем фасадної теплоізоляції з опорядженням штукатурками та дрібноштучними елементами на поширення вогню.
125. ДСТУ EN 60584-1:2016 Перетворювачі термоелектричні. Частина 1. Технічні характеристики та допустимі відхилення електрорушійної сили (EPC) (EN 60584-1:2013, IDT).

126. ДСТУ Б В.1.1-18:2007 Споруди та фрагменти будівель. Метод натурних вогневих випробувань. Загальні вимоги. Чинний від 2008-04-01. К.: Мінрегіонбуд України. 2007. 16 с.
127. ДСТУ Б В.2.6-189:2013 Методи вибору теплоізоляційного матеріалу для утеплення будівель / Мінрегіонбуд України. К.: Мінрегіонбуд України. 2014. 55с.
128. McGrattan, K., et al., Fire Dynamics Simulator User's Guide, FDS Version 6.2.0, SVN Repository Revision: 22352, NIST Special Publication 1019, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD USA, April 2015.
129. Fire Dynamics Simulator. Technical Reference Guide. Volume 1: Mathematical Model / NIST Special Publication 1018-1. Sixth Edition. 2015.
130. Fire Dynamics Simulator. Technical Reference Guide. Volume 3: Validation / NIST Special Publication 1018-3. Sixth Edition. 2015.
131. Про надання будівельної продукції на ринку: Закон України від 02.09.2020 № 850-IX. Відомості Верховної Ради (ВВР), 2021, № 14, ст.119. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/850-20#Text>

ДОДАТОК А

Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про
апробацію результатів дисертації

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Roman Yakovchuk, Andriy Kuzyk, Olexander Kagitin, Andriy Ivanusa and Sergiy Yemelyanenko (2021). FDS simulation of fire spreading on façade heat insulating system. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 635 (2021) 012009. Режим доступу: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/635/1/012009/pdf>
DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/635/1/012009>
2. Яковчук Р. С., Балло Я. В., Кузик А. Д., Кагітін О. І., Ковальчук В.М. (2021). FDS моделювання ефективності протипожежних карнизів на запобігання поширенню пожежі фасадними конструкціями висотних будівель. *Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності*, 23, С. 39-45.
DOI: <https://doi.org/10.32447/20784643.23.2021.06>
3. Яковчук Р. С., Кагітін О. І., Лоїк В. Б., Синельников О. Д., Галанченко Р. Р., Возняк О. О. (2021). Аналіз чинників, які впливають на поширення вогню конструкцією фасадної теплоізоляції з вентильованим повітряним прошарком. *Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності*, 24, 57-65.
DOI: <https://doi.org/10.32447/20784643.24.2021.07>
4. Балло Я. В., Яковчук Р. С., Ніжник В. В., Кагітін О. І. (2022). Аналіз та систематизація типів фасадних систем будівель як передумова удосконалення протипожежних заходів. *Пожежна безпека*, 40, С. 5-15.
DOI: <https://doi.org/10.32447/20786662.40.2022.01>
5. Балло Я. В., Яковчук Р. С., Кагітін О. І., Стилик І. Г. (2022). Аналіз основних методів оцінювання поширення пожежі по фасадах будівель. *Пожежна безпека*, 41, С. 20-30.
DOI: <https://doi.org/10.32447/20786662.41.2022.03>

6. Кагітін О. І., Веселівський Р. Б. (2023). Обґрунтування процедури проведення випробувань збірних систем фасадної теплоізоляції на поширення вогню. *Пожарна безпека*, 43, 63-75.

DOI: <https://doi.org/10.32447/20786662.43.2023.08>

7. Ballo, Y., Nizhnyk, V., Veselivsky, R., Kagitin, O. (2023). Influence of the facade slope on fire propagation processes on higher floors. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (10 (125)), 43–52.

DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.288174>

8. Kagitin, O., Veselivskyi, R., Havrys, A., Ballo, Y., Yakovchuk, R., Kovalyshyn, B. (2024). Determining the influence of facade parameters and the width of a fire-proof eaves on preventing the spread of fire through external vertical structures of buildings. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (1 (130)), 6–16.

DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.303640>

Апробація матеріалів дисертації:

1. Яковчук Р. С., Кагітін О. І., Скоробагатько Т. М. Моделювання параметрів вогневого випробування конструкції зовнішньої стіни із фасадною теплоізоляцією у середовищі FDS. *Надзвичайні ситуації: безпека та захист: матеріали X Всеукраїнської наук.-практ. конф. з міжнародною участю*. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗУ, 2020. С. 305-307.

2. Яковчук Р. С., Балло Я. В., Кагітін О. І. Чисельне моделювання впливу конструктивних параметрів протипожежних карнизів на поширення пожежі фасадом висотних будинків. *Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту: матеріали Міжнародної наук.-практ. конф. молодих учених*. Харків: НУЦЗУ, 2021. С. 34-35.

3. Яковчук Р. С., Балло Я. В., Кагітін О. І. Заходи підвищення пожежної безпеки конструкцій фасадної теплоізоляції з вентильованим повітряним прошарком. *Наука про цивільний захист як шлях становлення*

молодих вчених: матеріали Всеукраїнської наук.-практ. конф. курсантів, студентів, ад'юнктів (аспірантів). Черкаси: Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2022. С. 32-33.

4. Яковчук Р. С., Балло Я. В., Кагітін О. І. Основні методи оцінювання поширення пожежі по фасадах будівель. *Проблеми та перспективи розвитку системи безпеки життєдіяльності: зб. наук. праць Міжнародної наук.-практ. конф. молодих вчених, курсантів та студентів. Львів: ЛДУ БЖД, 2023. С.44-47*

ДОДАТОК Б

Акти впровадження результатів дисертаційної роботи

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор Товариства з
обмеженою відповідальністю
«ЮДК ПРОЕКТ»Д.Р. Ярема
«20» _____ 2023 року**АКТ**

впровадження результатів дисертаційної роботи

Кагітіна Олександра Івановича на тему

«Підвищення пожежної безпеки конструкцій зовнішніх стін житлових будинків із фасадною теплоізоляцією та горючим утеплювачем»

Даний акт складено про те, що результати дисертаційної роботи Кагітіна Олександра Івановича було впроваджено під час проектування нових цивільних об'єктів, а також під час розробки проектів з реконструкції таких будівель. Об'єктом впровадження є рекомендації щодо розробки та обґрунтування ефективності конструктивних параметрів протипожежних перешкод, які розташовуються по контуру багатоповерхових будинків для запобігання розповсюдження вогню поверхнею конструкцій зовнішніх стін житлових будинків із фасадною теплоізоляцією та горючим утеплювачем.

На основі проведених в роботі досліджень встановлено залежність щодо критерію не перевищення критичної температури у 250 °С на поверхні фасаду будівлі. Критерій досягається при ширині протипожежного карнизу не менше 0,4 м та висоті віконного міжповерхового простінку 1,0 м, а також при ширині карнизу 0,5 м та висоті віконного міжповерхового простінку 0,6 м.

Акт не призначено для використання під час фінансових операцій.

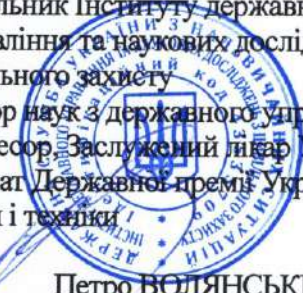
Інженер-проектувальник

«17» 11 2023 року

І.М. Ференц

ЗАТВЕРДЖУЮ

Начальник Інституту державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту
 доктор наук з державного управління, професор, Заслужений лікар України, лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки



Петро ВОЛЯНСЬКИЙ

«11» 03 2024 року

АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи

КАПТІНА Олександра Івановича на тему

«Підвищення пожежної безпеки конструкцій зовнішніх стін житлових будинків із фасадною теплоізоляцією та горючим утеплювачем»

Складено комісію:

голова комісії: заступник начальника ІДУ НД ЦЗ з наукової роботи, канд.техн.наук, ст. наук. співроб. КОВАЛЕНКО Віталій Володимирович;

члени комісії:

головний науковий співробітник науково-випробувального центру ІДУ НД ЦЗ д-р. техн. наук, ст. наук. співроб. ЖАРТОВСЬКИЙ Сергій Володимирович;

начальник науково-випробувального центру ІДУ НД ЦЗ, канд.техн.наук, ст. дослідник ДОБРОСТАН Олександр Васильович.

Комісія перевірила та цим актом засвідчує, що результати дисертаційної роботи КАПТІНА Олександра Івановича на тему «Підвищення пожежної безпеки конструкцій зовнішніх стін житлових будинків із фасадною теплоізоляцією та горючим утеплювачем» впроваджено у наукову діяльність науково-випробувального центру Інституту державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту шляхом застосування отриманої науково-методичної та експериментальної бази під час дослідження процесів поширення пожежі поверхнею конструкцій зовнішніх стін житлових будинків із фасадною теплоізоляцією та горючим утеплювачем. Отримані наукові результати дадуть змогу переглянути критерії ефективності обмеження поширення фасадної пожежі з їх подальшою інтеграцією в систему протипожежного захисту будівель та споруд.

Акт складено для надання в спеціалізовану вчену раду у зв'язку із захистом дисертації на здобуття освітньо-наукового ступеня доктора філософії зі спеціальності 261 пожежна безпека.

Голова комісії:

канд. техн. наук, ст. наук. співроб.

Члени комісії:

д-р техн. наук, ст. наук. співроб.

канд. техн. наук, ст. досл.



Віталій КОВАЛЕНКО



Сергій ЖАРТОВСЬКИЙ



Олександр ДОБРОСТАН

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з навчальної та методичної роботи Львівського державного університету безпеки життєдіяльності кандидат технічних наук, доцент

Дмитро ЧАЛИЙ

04 2024 року



впровадження результатів дисертаційної роботи

Кагітіна Олександра Івановича за темою:

«Підвищення пожежної безпеки конструкцій зовнішніх стін житлових будинків із фасадною теплоізоляцією та горючим утеплювачем»

Комісія у складі:

голови комісії – начальника навчально-методичного центру Львівського державного університету безпеки життєдіяльності Миколи СИЧЕВСЬКОГО;

членів комісії: начальника кафедри цивільного захисту та протимінної діяльності, доктора технічних наук, доцента Романа ЯКОВЧУКА; начальника кафедри наглядово-профілактичної діяльності та пожежної автоматики, кандидата технічних наук Олега ПАЗЕНА встановила, що результати дисертаційної роботи Олександра КАГІТІНА на тему «Підвищення пожежної безпеки конструкцій зовнішніх стін житлових будинків із фасадною теплоізоляцією та горючим утеплювачем» мають теоретичне та практичне значення та використовуються у навчальному процесі в університеті.

На кафедрі цивільного захисту та протимінної діяльності – навчальної дисципліни «Профілактична діяльність у сфері цивільного захисту» змістовного модуля №3 «Наглядова діяльність з пожежної безпеки», тема 17 «Забезпечення надійності та безпечної експлуатації будівель» підготовки бакалавра зі спеціальності 263 «Цивільна безпека».

На кафедрі наглядово-профілактичної діяльності та пожежної автоматики – навчальної дисципліни «Пожежна профілактика в населених пунктах» змістовного модуля №2 «Пожежна безпека при експлуатації будівель та споруд», тема 10 «Протипожежні вимоги при проектуванні та експлуатації житлових будівель та гуртожитків» підготовки бакалавра зі спеціальності 261 «Пожежна безпека».

Таким чином, результати дисертаційної роботи використані в лекційних курсах зазначених навчальних дисциплін при викладенні теоретичних положень щодо аналізу національної та міжнародної нормативної бази щодо вимог пожежної безпеки до збірних систем фасадної теплоізоляції зовнішніх стін будинків і споруд та методів їх оцінювання, а також дослідження впливу протипожежних перешкод на запобігання поширення пожежі вертикальними будівельними конструкціями житлових будівель.

Впровадження результатів дисертаційного дослідження забезпечує актуальний характер освіти та високий науково-методичний рівень викладання даних дисциплін і дозволяє підвищити якість проведення лекційних та практичних занять для здобувачів вищої освіти.

Голова комісії:

Микола СИЧЕВСЬКИЙ

Члени комісії:

Роман ЯКОВЧУК

Олег ПАЗЕН